

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE *PIPING* EM BARRAGENS**

**BÁRBARA GONÇALVES MOURÃO**  
**E**  
**CÁSSIO DE OLIVEIRA TORRES**

**ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM GEOTECNIA**

**BRASÍLIA / DF: JULHO / 2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE *PIPING* EM BARRAGENS**

**BÁRBARA GONÇALVES MOURÃO  
E  
CÁSSIO DE OLIVEIRA TORRES**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

**APROVADA POR:**

---

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (Universidade de Brasília)  
(ORIENTADOR)**

---

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc (Universidade de Brasília)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**ANA CAROLINA LOYOLA CAETANO RIOS, MSc (Universidade de Brasília)  
(EXAMINADORA EXTERNA)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 12 de julho de 2019.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

MOURÃO, BÁRBARA GONÇALVES

TORRES, CÁSSIO DE OLIVEIRA

Análise Probabilística de *Piping* em Barragens [Distrito Federal] 2019.

xv, 75 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Barragem de aterro compactado 2. *Piping*

3. Árvore de falhas

4. Árvore de eventos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Bacharel)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOURÃO, B.G. e TORRES, C.O. (2019). Análise Probabilística de *Piping* em Barragens, Publicação G.PF-001/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 75 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Bárbara Gonçalves Mourão e Cássio de Oliveira Torres

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise Probabilística de *Piping* em Barragens

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor

---

Bárbara Gonçalves Mourão

Condomínio Jardins do Lago QD 1, rua dos Jacarandás, casa 19

71680-372 – Brasília/DF - Brasil

---

Cássio de Oliveira Torres

SQN 406, Bloco A, apartamento 203

70847010 – Brasília/DF - Brasil

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que sempre nos supriu com sua paz e irresistível graça, além de nos dar força e coragem para vencer cada etapa da vida, seja a ele nossa primeira palavra de gratidão.

Ao Professor André Pacheco de Assis, por estar sempre disposto a nos ensinar e instruir com sua estimável experiência e pelo exemplo de profissional e pessoa.

À empresa que gentilmente nos forneceu os dados necessários para a pesquisa e à amiga Luísa, pelo incentivo e colaboração essenciais para que isso fosse possível.

Aos nossos pais, por serem responsáveis pela primeira e mais importante educação.

Aos nossos familiares, que sempre estiveram ao nosso lado nos apoiando, em especial ao primo João Felipe e às tias Maria Nilce e Neide por toda a hospitalidade e amor.

Aos nossos amigos, que nos ajudaram com dicas e troca de experiências, em especial aos colegas Ana Paula, André Luís, Carolina, Gabriel, Lucas e Mariana.

# ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE *PIPING* EM BARRAGENS

## RESUMO

Os estudos voltados para o rompimento de barragens são essenciais na garantia da segurança dessas estruturas de grande valor socioeconômico, o que pode ser feito com o uso da análise de risco. Essa ferramenta foi utilizada para calcular a probabilidade de ruptura de duas barragens de aterro compactado para o modo de falha de erosão interna (*piping*), na região do maciço para a fundação, são elas: a rompida barragem de Teton e a denominada Barragem X, que se encontra em funcionamento. Foram utilizadas duas metodologias, uma internacional denominada *Piping Toolbox* e outra elaborada pela empresa brasileira VALE, ambas baseadas em árvores de falhas, árvores de eventos e tabelas descritivas. As probabilidades foram calculadas para cada fase do processo de *piping*, tendo a etapa de “progressão” apresentado os resultados mais díspares entre os métodos e a etapa de “continuação” considerado os critérios mais diferentes entre si. Os valores finais foram comparados com um critério internacional de aceitabilidade que limita a probabilidade anual de falhas a um valor de  $1E-04$ , o qual foi atendido apenas pela Barragem X, com o uso do método da VALE. Quando comparados os dois métodos, verificou-se que o modo como são atribuídas as probabilidades no método da VALE o confere maior confiabilidade. Outrossim, este também se mostrou mais funcional, sobretudo devido à complexidade da etapa de iniciação do *Piping Toolbox*. Finalmente, embora ambos os métodos apresentem pontos de melhoria, eles são considerados viáveis quando se dispõe de projetos detalhados, além de dados de instrumentação e de ensaios geotécnicos.

# PROBABILISTIC ANALYSIS OF PIPING IN DAMS

## ABSTRACT

Studies focused on failure dams are essential in ensuring the safety of these structures of great socioeconomic value, which can be done by using risk analysis. This tool was used to calculate the probability of rupture of two embankment dams by the failure mode of internal erosion (piping), in the region from embankment to the foundation. The dams are the ruptured Teton dam and the denominated "Barragem X", which is in operation. It was used two methodologies, one international called Piping Toolbox and another one elaborated by the Brazilian company VALE, both based on fault trees, event trees and descriptive tables. Probabilities were calculated for each stage of the piping process. It was verified that "progression" stage presented the most disparate results between the methods and that on the "continuing" step there was the most different criteria. The final values were compared with an international acceptability criteria that limits the annual probability of failure to a value of  $1E-04$ , which was attended only by "Barragem X", using the VALE method. When comparing the methods, it was verified that the manner the probabilities are attributed in the VALE one confers it a greater reliability. This method was also more functional, mainly due to complexity of initiation stage from Piping Toolbox. Finally, although both methods show improvement points, they are considered viable when detailed projects are available, as well as instrumentation and geotechnical testing data.

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	OBJETIVOS.....	2
1.1.1	OBJETIVO GERAL .....	2
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.2	ESCOPO DO PROJETO.....	2
2	RUPTURA DE BARRAGENS.....	3
2.1	MODOS DE FALHA .....	3
2.1.1	GALGAMENTO.....	4
2.1.2	EROSÃO INTERNA .....	4
2.1.3	INSTABILIDADE DE TALUDES.....	5
2.1.4	INSTABILIDADE SÍSMICA.....	6
2.2	CASOS HISTÓRICOS.....	7
2.2.1	BARRAGEM DA PAMPULHA .....	7
2.2.2	BARRAGEM DE TETON.....	8
3	ANÁLISE DE RISCO.....	11
3.1	DEFINIÇÕES.....	11
3.2	MÉTODOS.....	13
4	O PROCESSO DE <i>PIPING</i> .....	16
4.1	INICIAÇÃO .....	16
4.2	CONTINUAÇÃO.....	18
4.3	PROGRESSÃO .....	19
4.4	ABERTURA DA BRECHA.....	20
5	METODOLOGIA .....	22
5.1	METODOLOGIA VALE.....	22
5.2	METODOLOGIA <i>PIPING TOOLBOX</i> .....	26
5.2.1	CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAGENS .....	31

6	RESULTADOS .....	35
6.1	BARRAGEM DE TETON .....	35
6.1.1	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA <i>PIPING TOOLBOX</i> .....	35
6.1.2	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA VALE .....	44
6.2	BARRAGEM X.....	50
6.2.1	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA <i>PIPING TOOLBOX</i> .....	50
6.2.2	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA VALE .....	59
6.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS.....	65
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	69
	REFERÊNCIAS .....	71
	ANEXO A – TESTE DE PERDA D’ÁGUA NA BARRAGEM DE TETON (INDEPENDENT PANEL, 1976).....	74
	ANEXO B – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE MATERIAIS DA BARRAGEM X (GEOTÉCNICA, 1971).....	75

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução de uma brecha provocada por galgamento. i) brecha inicial; ii) brecha intermédia em V; iii) momento final com erosão lateral (modificado - Johnson e Illes, 1976).	4
Figura 2: i - Exemplo de erosão interna no maciço da barragem; ii - na fundação da barragem; iii - do maciço à fundação da barragem (modificado - USACE, 2015).	5
Figura 3: Instabilidade de taludes por deslizamento (DAS e SOBHAN, 2014).	6
Figura 4: Seção típica da barragem da Pampulha (VARGAS, 1977 apud BRAZ, 2003).	7
Figura 5: Detalhe do rompimento da barragem da Pampulha (LOPES, 2010).	8
Figura 6: Rompimento da barragem de Teton, USA (ICOLD, 2017).	9
Figura 7: Vazão de descarga observada durante a ruptura da barragem de Teton (ZHANG et al, 2016).	9
Figura 8: Diagrama de árvore de falhas com representação de portas lógicas (modificado - ZHANG et al., 2016).	13
Figura 9: Modelo de árvore de eventos (modificado - HARTFORD e BAECHER, 2004).	14
Figura 10: Diagrama sequencial de um modo de ruptura do método FMEA (ZHANG et al., 2016).	15
Figura 11: Mecanismos de iniciação de <i>piping</i> (modificado - ZHANG <i>et al.</i> , 2016).	16
Figura 12: Esquema de solo sujeito à erosão de contato (USACE, 2015).	17
Figura 13: i- alargamento excessivo de um canal de <i>piping</i> , ii – instabilidade do talude de jusante, iii – galgamento por assentamento do coroamento, iv – destacamento de material do talude de jusante (modificado - CALDEIRA e SANTOS, 2008).	21
Figura 14: Árvore de eventos padronizada para o modo de falha de erosão interna – mecanismo final de falha de alargamento do tubo (VALE, 2015).	22
Figura 15: Árvore de falhas para a modalidade de iniciação do maciço para a fundação (VALE, 2015).	24
Figura 16: Árvore de falhas para formação de tubo - habilidade em suportar um teto (VALE, 2015).	24
Figura 17: Árvore de falhas para a progressão - tubo permanece aberto (VALE, 2015).	25
Figura 18: Árvore de falhas sobre a incapacidade de deteção e intervenção (VALE, 2015).	25
Figura 19: Árvore de falhas para o mecanismo de falha de alargamento do tubo (VALE, 2015).	26
Figura 20: Árvore de eventos para estimativa da probabilidade de ruptura (modificado – FELL <i>et al.</i> , 2015).	27

Figura 21: Seção transversal da barragem de Teton subdividida em regiões de diferentes materiais (modificado - INDEPENDENT PANEL, 1976). .....	32
Figura 22: Fotografias da rocha de fundação, com destaque para uma abertura de 51mm a direita (INDEPENDENT PANEL, 1976).....	33
Figura 23: Seção transversal da Barragem X em regiões de diferentes materiais (modificado - PERINI, 2009).....	34
Figura 24: $P_{CR}$ versus $\sum RF \times LF$ (FELL <i>et al.</i> , 2008). .....	36
Figura 25: $P_{nol}$ versus $\sum RF \times LF$ (FELL <i>et al.</i> , 2008). .....	41
Figura 26: Cálculo da probabilidade de iniciação por erosão do maciço para a fundação – barragem de Teton (modificado – VALE, 2015). .....	45
Figura 27: Cálculo da probabilidade de formação de tubo – barragem de Teton (modificado – VALE, 2015). .....	46
Figura 28: Cálculo da probabilidade para a permanência do tubo aberto – barragem de Teton (modificado – VALE, 2015). .....	47
Figura 29: Cálculo da probabilidade para a incapacidade de detecção e intervenção – barragem de Teton (modificado – VALE, 2015). .....	49
Figura 30: Cálculo da probabilidade para a formação do mecanismo de falha – barragem de Teton (modificado – VALE, 2015). .....	50
Figura 31: Distribuição das regiões e materiais adotados (PERINI, 2009). .....	52
Figura 32: Simulação da Barragem X no software SEEP/W, com destaque para o local de análise do gradiente hidráulico.....	52
Figura 33: Gradientes hidráulicos na região indicada na Figura 32.....	53
Figura 34: $P_{nol}$ versus $\sum RF \times LF$ (FELL <i>et al.</i> , 2008). .....	56
Figura 35: Cálculo da probabilidade de iniciação por erosão do maciço para a fundação – Barragem X (modificado – VALE, 2015).....	60
Figura 36: Cálculo da probabilidade de formação de tubo – Barragem X (modificado – VALE, 2015).....	61
Figura 37: Cálculo da probabilidade para a permanência do tubo aberto – Barragem X (modificado – VALE, 2015). .....	62
Figura 38: Cálculo da probabilidade para a incapacidade de detecção e intervenção – Barragem X (modificado – VALE, 2015). .....	64
Figura 39: Cálculo da probabilidade para a formação do mecanismo de falha – Barragem X (modificado – VALE, 2015). .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estatísticas de falhas em barragens de aterro compactado (modificado – FOSTER <i>et al.</i> , 2000). .....	3
Tabela 2: Categorias relacionadas com o caminho do <i>piping</i> na barragem (USACE, 2015). ...	5
Tabela 3: Possíveis maneiras em que um terremoto pode causar a falha de uma barragem de aterro compactado (SEED, 1979).....	6
Tabela 4: Cenários de continuação do <i>piping</i> (modificado - FELL <i>et al.</i> , 2008).....	19
Tabela 5: Chance de ocorrência do fator de influência em termos descritivos e o seu equivalente valor de probabilidade (VALE, 2015).....	23
Tabela 6: Probabilidade de continuação da erosão interna (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	29
Tabela 7: Seleção dos mecanismos de violação por erosão interna (modificado - FELL <i>et al.</i> , 2015).....	30
Tabela 8: Propriedades físicas de amostras do material remanescente sobre parede direita do <i>cut off</i> .....	32
Tabela 9: Valores médios do material de amostragem da Jazida II. ....	34
Tabela 10: Fatores de influência na probabilidade de caminhos contínuos na rocha de fundação ( $P_{CR}$ ) - (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	35
Tabela 11: Classificação da taxa de perda em ensaios de perda d'água (SANDRONI, 2006).37	
Tabela 12: Probabilidade do tratamento do <i>cut off</i> não impedir o contato do núcleo com aberturas da fundação ( $P_{TI}$ ) – barragem de Teton (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	37
Tabela 13: Estimativa da probabilidade de iniciação a partir de uma fissura para solos CL-ML – barragem de Teton (FELL <i>et al.</i> , 2008). ....	38
Tabela 14: Estimativa da probabilidade de continuação para o cenário 4 ( $P_{CE}$ ) – barragem de Teton (FELL <i>et al.</i> , 2008). ....	38
Tabela 15: Probabilidade de o solo suportar o teto de um tubo de <i>piping</i> ( $P_{PR}$ ) – barragem de Teton (FELL <i>et al.</i> , 2008). ....	39
Tabela 16 :Probabilidade de um preenchimento não impedir o desenvolvimento do tubo ( $P_{PC}$ ) – barragem de Teton (FELL <i>et al.</i> , 2008). ....	39
Tabela 17: Fatores que influenciam a probabilidade de um fluxo concentrado não ser observável ( $P_{nol}$ ) – barragem de Teton (FELL <i>et al.</i> , 2008). ....	40
Tabela 18: Probabilidade de não detectar a erosão interna ( $P_{nd}$ ) dado o tempo para o desenvolvimento do fluxo concentrado e para ruptura inicial – barragem de Teton (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	41

Tabela 19: Probabilidade de que, dado que o fluxo concentrado é detectado, a intervenção e o reparo não são bem-sucedidos (P <sub>ui</sub> ) – barragem de Teton (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	42
Tabela 20: Probabilidade de abertura da brecha pelo alargamento do tubo (P <sub>ge</sub> ) – barragem de Teton (FELL <i>et al.</i> , 2008). .....	43
Tabela 21: Resumo das probabilidades encontradas pelo método do <i>Piping Toolbox</i> para a barragem de Teton.....	43
Tabela 22: Fatores de influência na probabilidade de iniciação de erosão interna: gradiente hidráulico - barragem de Teton (VALE, 2015).....	44
Tabela 23: Fatores de influência na probabilidade de iniciação de erosão interna - erodibilidade do maciço para a fundação - barragem de Teton (VALE, 2015). .....	44
Tabela 24: Fator de influência na probabilidade de continuação do processo - barragem de Teton (VALE, 2015).....	45
Tabela 25: Fatores de influência na probabilidade de formação de tubo: habilidade de suportar um teto - barragem de Teton (VALE, 2015).....	46
Tabela 26: Fatores de influência na probabilidade de progressão do tubo: erodibilidade da fundação ao longo do fluxo - barragem de Teton (VALE, 2015).....	46
Tabela 27: Fatores de influência na probabilidade de progressão do tubo - limitação do fluxo pela fundação - barragem de Teton (VALE, 2015).....	47
Tabela 28: Fatores de influência na probabilidade de incapacidade de detecção e intervenção – barragem de Teton (VALE, 2015). .....	48
Tabela 29: Fatores de influência na probabilidade de incapacidade de detecção e intervenção – barragem de Teton (VALE, 2015). .....	48
Tabela 30: Fatores de influência na probabilidade de formação de brecha: alargamento do tubo - barragem de Teton (VALE, 2015).....	49
Tabela 31: Resumo das probabilidades encontradas pelo método da VALE para a barragem de Teton.....	50
Tabela 32: Probabilidade do tratamento do <i>cut off</i> não impedir o contato do núcleo com aberturas da fundação (P <sub>TI</sub> ) – Barragem X (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	51
Tabela 33: Descrição dos materiais empregados e permeabilidades adotadas (PERINI, 2009). .....	52
Tabela 34: Estimativa da probabilidade de iniciação a partir de uma fissura para solos CL-ML – Barragem X (FELL <i>et al.</i> , 2008). .....	53
Tabela 35: Estimativa da probabilidade de continuação para o cenário 4 – Barragem X (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	54

Tabela 36: Probabilidade de o solo suportar o teto de um tubo de <i>piping</i> ( $P_{PR}$ ) – Barragem X (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	54
Tabela 37 :Probabilidade de um preenchimento não impedir o desenvolvimento do tubo ( $P_{PC}$ ) – Barragem X (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	55
Tabela 38: Fatores que influenciam a probabilidade de um fluxo concentrado não ser observável ( $P_{nol}$ ) – Barragem X (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	55
Tabela 39: Probabilidade de não detectar a erosão interna ( $P_{nd}$ ) dado o tempo para o desenvolvimento do fluxo concentrado – Barragem X (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	56
Tabela 40: Probabilidade de que, dado que o fluxo concentrado é detectado, a intervenção e o reparo não são bem-sucedidos ( $P_{ui}$ ) – Barragem X (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	57
Tabela 41: Probabilidade de abertura da brecha pelo alargamento do tubo ( $P_{ge}$ ) – Barragem X (FELL <i>et al.</i> , 2008).....	58
Tabela 42: Resumo das probabilidades encontradas pelo método do <i>Piping Toolbox</i> para a Barragem X. ....	58
Tabela 43: Fatores de influência na probabilidade de iniciação de erosão interna: gradiente hidráulico - Barragem X (VALE, 2015). ....	59
Tabela 44: Fatores de influência na probabilidade de iniciação de erosão interna: erodibilidade do maciço para a fundação - Barragem X (VALE, 2015).....	59
Tabela 45: Fatores de influência na probabilidade de formação de tubo: habilidade de suportar um teto – Barragem X (VALE, 2015).....	60
Tabela 46: Fatores de influência na probabilidade de progressão do tubo: erodibilidade da fundação ao longo do fluxo - Barragem X (VALE, 2015).....	61
Tabela 47: Fatores de influência na probabilidade de progressão do tubo: limitação do fluxo pela fundação - Barragem X (VALE, 2015). ....	62
Tabela 48: Fatores de influência na probabilidade de incapacidade de detecção e intervenção – Barragem X (VALE, 2015).....	63
Tabela 49: Fatores de influência na probabilidade de incapacidade de detecção e intervenção – Barragem X (VALE, 2015).....	63
Tabela 50: Fatores de influência na probabilidade de formação de brecha: alargamento do tubo - Barragem X (VALE, 2015).....	64
Tabela 51: Resumo das probabilidades encontradas pelo método da VALE para a Barragem X. ....	65
Tabela 52: Resultados do nó da progressão. ....	66
Tabela 53: Comparação entre os critérios adotados em cada método.....	67

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ETA - Análise por Árvores de Eventos

FEMA - Agência Federal de Gerenciamento de Emergências (EUA)

FMEA - Análise dos Modos de Falha e Efeitos

FTA - Análise por Árvores de Falhas

ICOLD - International Commission on Large Dams

IM<sub>x</sub> – Mecanismo de iniciação “x”

JOS - tamanho da fratura aberta na fundação

JOS<sub>CE</sub> - tamanho da abertura na fundação que dará continuidade ao processo de *piping*

LF - Fator de probabilidade

N° - Número

NA - Nível d'água

PAE - Plano de Ação Emergencial

P<sub>br</sub> - Probabilidade de abertura da brecha

P<sub>CE</sub> - Probabilidade de continuação

P<sub>CR</sub> - Probabilidade de haver descontinuidades conectadas na rocha de fundação

P<sub>e</sub> - Probabilidade associada ao modo de iniciação de erosão regressiva ou sufusão

P<sub>EE</sub> - Probabilidade de haver erosão em excesso

P<sub>f</sub> – probabilidade final

P<sub>ge</sub> - Probabilidade de falha por alargamento do tubo de erosão interna

P<sub>hf</sub> - Probabilidade associada ao modo de iniciação de fratura hidráulica

P<sub>I</sub> - Probabilidade de iniciação

P<sub>IC</sub> - Probabilidade da erosão iniciar através da fissura, dado a largura da fissura, o gradiente hidráulico médio e as propriedades do solo.

P<sub>nd</sub> - Probabilidade de uma erosão concentrada não ser detectada

$P_{NE}$  - Probabilidade de não haver *piping*

$P_{no}$  - Probabilidade de falha da intervenção

$P_{nol}$  - Probabilidade de uma erosão concentrada não ser observável

$P_P$  - Probabilidade de progressão

$P_{path}$  - probabilidade de ocorrência de uma via contínua de descontinuidades em solos rochosos ou de granulação grossa

$P_{PC}$  - probabilidade da abertura ser preenchida, mas não cessar o processo de erosão

$P_{PL}$  - probabilidade de que o fluxo não seja restringido pela zona de montante

$P_{PR}$  - probabilidade do solo suportar o teto de um tubo de *piping*

$P_{SE}$  - Probabilidade de haver alguma erosão

$P_{sf}$  - Probabilidade de falha por assentamento da crista da barragem

$P_{si}$  - Probabilidade de falha por instabilidade de taludes

$P_{TI}$  – Probabilidade que considera se o tratamento na base de corte do aterro pode não evitar o contato do núcleo com aberturas da fundação

$P_{ui}$  - Probabilidade de uma erosão concentrada não ser efetivamente reparada

$P_{un}$  - Probabilidade de falha por desestruturação do talude de jusante

RF - Fator de importância relativa

UNSW – Universidade de Nova Gales do Sul

URS - Serviço de Pesquisas Unidas

USACE - Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos

USBR - Bureau de Reclamação dos Estados Unidos

## 1 INTRODUÇÃO

As barragens têm se mostrado essenciais para a sociedade, contribuindo significativamente para seu desenvolvimento socioeconômico. Suas utilidades são diversas, tais como abastecimento de água, irrigação, controle de cheias, geração de energia, contenção de rejeitos, navegação (Principais Benefícios das Barragens, 2013). Portanto, é de grande valia que se aprenda, cada vez mais, a lidar com as ameaças ao funcionamento satisfatório dessas estruturas, sendo o seu rompimento a principal delas. Assim, conforme afirma FEMA (2015), pode-se atuar sobre o monitoramento, a mitigação ou a avaliação dos fatores que levam as barragens a ruírem, como objetiva o trabalho por meio da análise de risco.

Nas palavras de Zhang et al. (2016), as barragens podem ser classificadas de várias maneiras, a depender de seu tamanho, dos materiais utilizados, dos tipos estruturais, dos métodos de construção. Em relação aos materiais utilizados, as barragens podem ser classificadas como barragens de terra, enrocamento, concreto, entre outras. Aquelas de terra e de enrocamento compõem juntas o grupo chamado de aterro compactado, o tipo mais comum de ser encontrado.

Conforme dados de ICOLD (2017), uma barragem pode romper tanto por erosão (externa ou interna) quanto por instabilidade, sendo a ocorrência por erosão bastante expressiva sobretudo em barragens de aterro compactado. A erosão interna consiste no carreamento de partículas de solo devido ao fluxo de água no corpo da barragem, na fundação, ou entre aterro e fundação.

Em barragens novas, pode-se mitigar ou até mesmo cessar esse fenômeno projetando filtros ou zonas de transição adequados (ICOLD, 2017). Já em barragens antigas, em que não se encontram tais mecanismos de defesa, a análise de risco aparece como um procedimento ainda mais significativo.

O risco é uma medida entre a probabilidade de ocorrência de um evento e os consequentes danos a pessoas, propriedades ou meio ambiente. Segundo Caldeira (2008), os principais métodos para conduzir uma análise de risco em Geotecnia são o FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) - Análise de Modos de Falhas e Efeitos -, o FTA (*Fault Tree Analysis*) - Árvore de Falhas - e o ETA (*Event Tree Analysis*), que será chamada de Árvore de Eventos. Nesse trabalho a análise de risco se dará pelo uso do ETA e do FTA, se restringindo somente ao cálculo de probabilidades, ou seja, não envolvendo a estimativa de danos.

Ademais, neste documento o termo “erosão interna” será utilizado como sinônimo de *piping*, conforme prática internacional. Como declara FEMA (2015), inicialmente o termo *piping* era utilizado para descrever a formação de um tubo através do solo e subsequente lavagem de

material. Com o avanço dos estudos sobre o solo, foram descritos outros mecanismos internos de erosão, no entanto ainda se adota o *piping* como um termo abrangente.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO GERAL**

Utilizar os métodos de análise de risco de Árvore de Eventos e de Árvore de Falhas para estimar as probabilidades de ruptura por *piping*, na região do maciço para a fundação, em barragens de aterro compactado.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar os cálculos de probabilidade de ruptura para uma barragem que rompeu por *piping* e outra que se encontra em funcionamento;
- Verificar a adequação dos resultados aos critérios de aceitabilidade;
- Identificar as diferenças e semelhanças entre as duas metodologias utilizadas;
- Analisar as probabilidades atribuídas aos critérios de influência no processo de *piping*;
- Analisar a funcionalidade das metodologias.

## **1.2 ESCOPO DO PROJETO**

Esse projeto está dividido em seis capítulos.

O presente Capítulo 1 introduz o leitor aos assuntos abordados no trabalho, apresentando brevemente o tema e os objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 2 aborda dois casos de barragens que romperam por *piping*, sendo uma delas localizada no Brasil.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica a respeito da análise de risco, destacando sua relevância e apresentando três métodos muito utilizados na etapa de cálculo de probabilidades da análise de risco.

O Capítulo 4 descreve as etapas do processo de *piping*, explicando suas respectivas características.

O Capítulo 5 apresenta as metodologias utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 6 aborda os resultados encontrados, bem como suas análises e comparações entre as metodologias.

O Capítulo 7 conta com as considerações finais, incluindo as limitações das metodologias e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 RUPTURA DE BARRAGENS

Tendo em vista seu elevado potencial de destruição, a ruptura de uma barragem pode gerar inúmeras consequências a comunidades vizinhas e ocasionar uma enorme destruição do meio ambiente. Daí a fundamental importância de conhecer os mecanismos de ruptura de barragens e avançar no entendimento sobre esse assunto para evitar novas tragédias.

### 2.1 MODOS DE FALHA

Segundo Ladeira (2007), as barragens vêm sofrendo alterações em decorrência de problemas manifestados durante e após a conclusão da construção dessas estruturas. Assim, passou-se a valorizar mais a etapa de projeto e estudos de retroanálise, representando um grande passo da engenharia em matéria de segurança de barragens, visto que, ainda na década de 1960, essas obras não levavam em consideração aprendizados em problemas de casos similares.

Foster *et al.* (2000) afirma que as barragens podem romper de quatro formas distintas: galgamento, erosão interna, instabilidade de taludes e instabilidade sísmica. Analisando as estatísticas sobre ruptura de grandes barragens construídas até 1986, excluindo as barragens construídas no Japão antes de 1930 e na China (Tabela 1), observa-se que o galgamento e a erosão interna representam juntos uma parcela considerável de 94,5% das rupturas.

Tabela 1: Estatísticas de falhas em barragens de aterro compactado (modificado – FOSTER *et al.*, 2000).

Modo de ruptura	Nº de casos		% de rupturas (modo de ruptura conhecido)	
	Rupturas (total)	Ruptura em operação	Rupturas (total)	Ruptura em operação
<b>Galgamento e estruturas auxiliares</b>				
Galgamento	46	40	35,9	34,2
Vertedouro-comporta	16	15	12,5	12,8
<u>Subtotal</u>	<u>62</u>	<u>55</u>	<u>48,4</u>	<u>47</u>
<b>Erosão interna</b>				
Através do maciço	39	38	30,5	32,5
Através do maciço	19	18	14,8	15,4
Do maciço para a fundação	2	2	1,6	1,7
<u>Subtotal</u>	<u>59</u>	<u>57</u>	<u>46,1</u>	<u>48,7</u>
<b>Instabilidade de taludes</b>				
Montante	6	4	4,7	3,4
Jusante	1	1	0,8	0,9
<u>Subtotal</u>	<u>7</u>	<u>5</u>	<u>5,5</u>	<u>4,3</u>
<b>Instabilidade sísmica</b>				
Modo desconhecido	8	7	1,6	1,7
Nº total de rupturas	136	124		
Nº total de rupturas (modo conhecido)	128	117		
Nº de barragens de aterro compactado	11.192	11.192		

### 2.1.1 GALGAMENTO

Sendo uma das mais frequentes causas para a ruptura de uma barragem, o galgamento abrange 48,4% das rupturas conhecidas nas condições da Tabela 1. Segundo Balbi (2005), o modo de falha por galgamento acontece quando o nível de água do reservatório aumenta a ponto de ultrapassar a cota máxima da barragem. Esse fenômeno normalmente acontece quando chuvas intensas promovem uma alta elevação no nível de água, gerando vazões maiores do que a capacidade do vertedouro e provocando, assim, a destruição da barragem.

Assim como as propriedades do material e as características do aterro, a duração do galgamento é um dos fatores mais determinantes na dimensão das brechas de ruptura (JÓNATAS, 2013). Segundo Johnson e Illes (1976), em barragens de aterro, o início da brecha advém com uma forma triangular, em que, com a saída da água pela superfície da barragem, são erodidos os materiais menos resistentes. Caso sejam mantidos os níveis elevados da cheia, a geometria tende a tomar uma forma trapezoidal, sendo a extensão dessa erosão nas laterais da brecha dependente da dimensão do reservatório e do volume de água armazenada. A Figura 1 ilustra as etapas citadas acima.

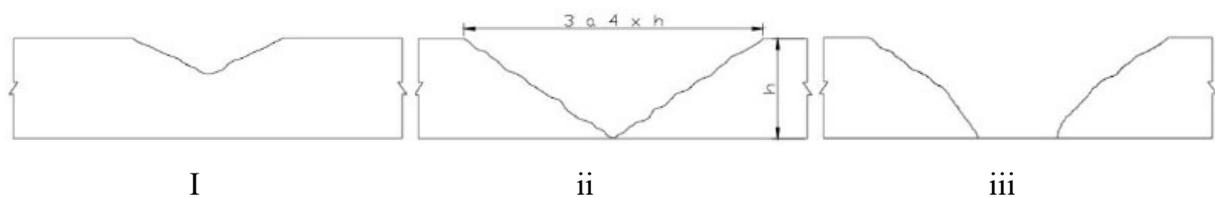


Figura 1: Evolução de uma brecha provocada por galgamento. i) brecha inicial; ii) brecha intermédia em V; iii) momento final com erosão lateral (modificado - Johnson e Illes, 1976).

### 2.1.2 EROSÃO INTERNA

As rupturas por *piping* são originadas pelo carreamento de partículas de solo devido à percolação da água através da barragem (FEMA, 2015). Conforme pode ser observado na Tabela 1, para o dado período, sua ocorrência representa 46,1% do total de rupturas de modo conhecido.

O processo de *piping* pode ter início por meio de quatro mecanismos: fluxo concentrado, erosão regressiva, sufusão e erosão de contato, e pode ocorrer em diferentes localidades da barragem, conforme apresentado na Tabela 2 e exemplificado na Figura 2. Esse processo será melhor descrito no Capítulo 4.

Tabela 2: Categorias relacionadas com o caminho do *piping* na barragem (USACE, 2015).

a. Erosão interna através do aterro (Figura 2 - i).
b. Erosão interna do aterro para a fundação, incluindo na superfície de contato (Figura 2 - ii).
c. Erosão interna através da fundação (Figura 2 - iii).
d. Erosão interna em/ao longo de estruturas auxiliares, como paredes do vertedouro.
e. Erosão interna nos drenos.

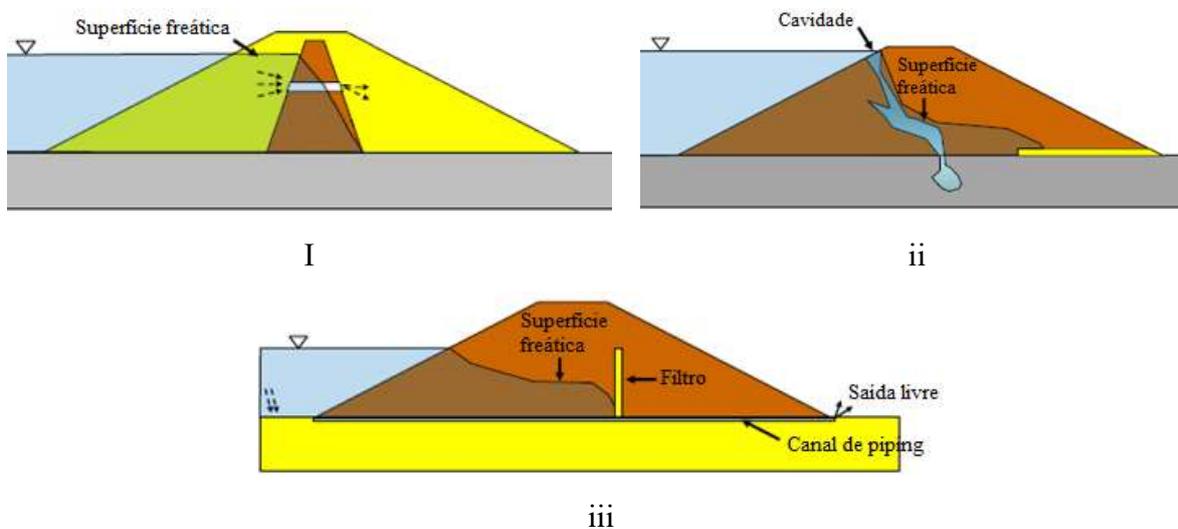


Figura 2: i - Exemplo de erosão interna no maciço da barragem; ii - na fundação da barragem; iii - do maciço à fundação da barragem (modificado - USACE, 2015).

### 2.1.3 INSTABILIDADE DE TALUDES

A instabilidade de talude é caracterizada pela mobilização de uma massa de solo, sendo o deslizamento (Figura 3) o mecanismo de instabilidade mais comum em barragens, o qual se caracteriza pelo movimento descendente de uma massa de solo em uma superfície de ruptura.

As variações nas condições de poropressão e carregamento e variações nas forças de cisalhamento do aterro resultam em mudanças nos fatores de segurança de encostas. Como consequência, muitas vezes é necessário realizar análises de estabilidade correspondentes a várias condições que refletem diferentes etapas da vida de uma barragem, como final de construção, primeiro enchimento, operação e rebaixamento rápido, uma vez que o fator de segurança contra a instabilidade de taludes pode aumentar ou diminuir.

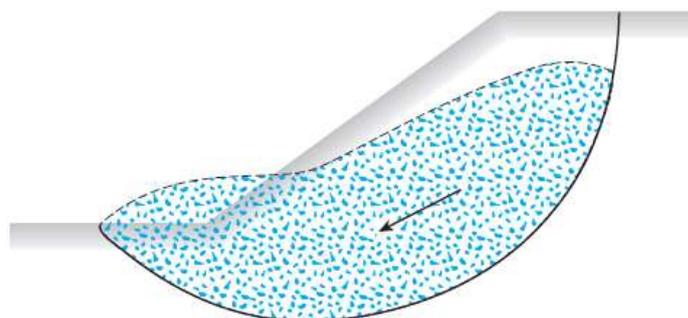


Figura 3: Instabilidade de taludes por deslizamento (DAS e SOBHAN, 2014).

### 2.1.4 INSTABILIDADE SÍSMICA

Tremores submetem uma barragem a variações cíclicas de carregamento em um curto intervalo de tempo, podendo causar instabilidades ou deformações permanentes nos taludes, dependendo da gravidade do tremor e do seu efeito sobre a resistência do aterro (DUNCAN et al., 2014). Ladeira (2007) declara que esses abalos sísmicos também podem liquefazer os solos do maciço da barragem, sendo função da frequência de ocorrência e da magnitude do tremor.

Por conseguinte, deve-se pensar em medidas que minimizem o efeito danoso desse fenômeno sobre as barragens, sobretudo em áreas mais suscetíveis a uma instabilidade sísmica. Segundo Seed (1979), deve-se inclusive atentar para a possibilidade de acontecerem falhas retardadas (aquelas que ocorrem mesmo após os movimentos do terremoto terem parado) devido à redistribuição da pressão da água nos poros dentro de um aterro. Na Tabela 3 são mostrados os prováveis mecanismos de falha derivados de uma instabilidade sísmica.

Tabela 3: Possíveis maneiras em que um terremoto pode causar a falha de uma barragem de aterro compactado (SEED, 1979).

i.	Rompimento da barragem por movimento de falha principal na fundação
ii.	Perda de bordo livre devido a movimentos tectônicos diferenciais
iii.	Falhas de declive induzidas por movimentos do solo
iv.	Perda do bordo livre devido a falhas de declividade ou compactação do solo
v.	Deslizamento da barragem em materiais fracos da fundação
vi.	<i>Piping</i> através de rachaduras induzidas por movimentos do solo
vii.	Galgamento da barragem
viii.	Falha do vertedouro ou outro dispositivo de descarga

## 2.2 CASOS HISTÓRICOS

### 2.2.1 BARRAGEM DA PAMPULHA

No Brasil, um memorável exemplo de acidente originado por *piping* foi a ruptura, no dia 20 de maio de 1954, da barragem da Pampulha localizada na cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais, durante seu período de operação (Museu Virtual Pampulha, 2012).

De acordo com Braz (2003), inaugurada em 1941, a barragem da Pampulha contava com 16,5 metros de altura, 330 metros de comprimento e 18 hm<sup>3</sup> de volume de reservatório. Consistia em uma barragem de terra homogênea com face de concreto, este que deveria funcionar como elemento de vedação. Por sua vez, o sistema de drenagem era constituído de drenos franceses normais ao eixo da barragem, os quais podem ser observados na Figura 4.

Segundo Neto (2016) e Vargas (1977) apud Braz (2003), de acordo com a comissão técnica responsável pela avaliação do episódio na época, quatro dias antes da ruptura foi observado um forte jato de água à jusante da barragem, junto ao dreno de pé, justificado posteriormente por uma fenda na placa de concreto do talude de montante e pelo dimensionamento inadequado dos drenos. Ainda segundo a comissão, a fenda se deu por recalques das fundações da barragem.

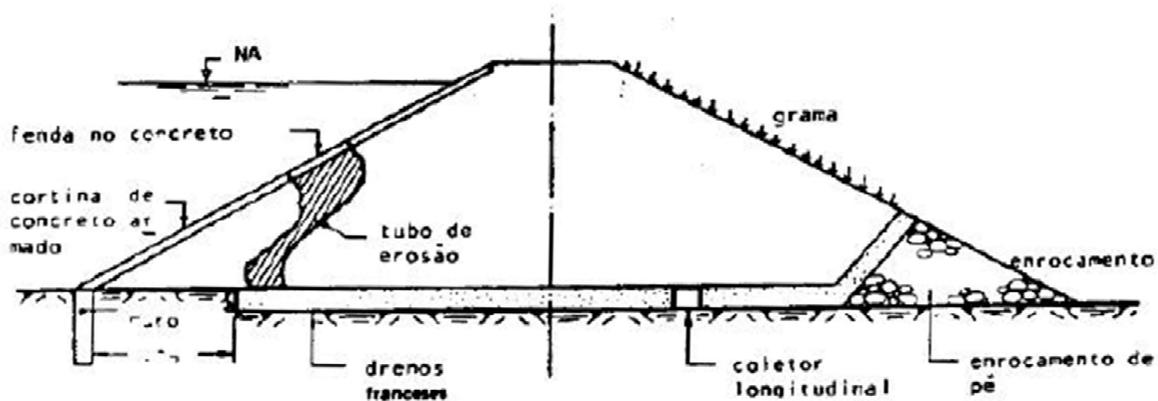


Figura 4: Seção típica da barragem da Pampulha (VARGAS, 1977 apud BRAZ, 2003).

Neto (2016) descreve que se buscou então adotar medidas emergenciais como esvaziar o reservatório ou vedar a fenda na cortina de concreto. Contudo, estas providências não foram suficientes para cessar o fluxo de água, o qual, pelo contrário, foi intensificado nos dias seguintes, aumentando progressivamente e carreando cada vez mais material. Já havia se iniciado, portanto, o processo de formação de um túnel ao longo do maciço, caracterizando a ocorrência de *piping*.

Segundo Museu Virtual Pampulha (2012), com a ruptura, plantas e animais foram perdidos, inundou-se toda a área do aeroporto da Pampulha, casas desmoronaram, além dos sistemas de abastecimento de energia e água terem sido comprometidos, sendo necessário uma rede de abastecimento provisória até a reinauguração da barragem em 1958. Apesar de catastrófica, a ocasião não provocou vítimas, possivelmente pelo então baixo povoamento da região. A Figura 5 apresenta uma imagem da barragem já rompida.



Figura 5: Detalhe do rompimento da barragem da Pampulha (LOPES, 2010).

### **2.2.2 BARRAGEM DE TETON**

Como relata ICOLD (2017), a barragem de Teton em Idaho, nos Estados Unidos, rompeu durante seu primeiro enchimento em 5 de junho de 1976. No episódio, foram contabilizadas 14 mortes e avaliou-se os danos materiais entre 400 milhões e 1 bilhão de dólares. A barragem é zonada com núcleo central, tem 93 metros de altura e, em consonância com as práticas da época, não foram providenciados filtros para evitar a ocorrência de erosão interna. A Figura 6 mostra imagens do rompimento da barragem.



Figura 6: Rompimento da barragem de Teton, USA (ICOLD, 2017).

De acordo com Silveira (2014), como pode ser observado na Figura 7, uma vez iniciado, o processo de *piping* progrediu rapidamente ao longo da barragem e logo a conduziu para uma ruptura completa - segundo FEMA (2015), pelo alargamento do canal de *piping* - em um tempo aproximado de 5 horas. Estima-se que entre as primeiras manifestações superficiais da erosão interna e o colapso da barragem o tempo decorrido não tenha ultrapassado 15 horas.

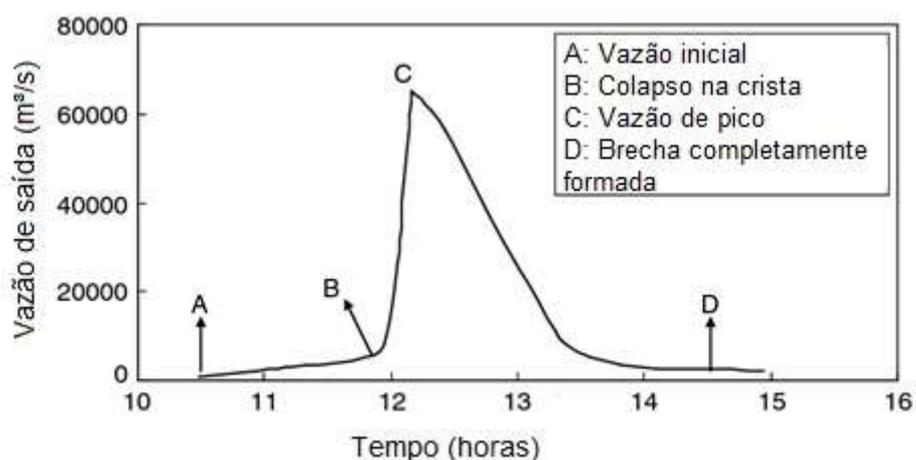


Figura 7: Vazão de descarga observada durante a ruptura da barragem de Teton (ZHANG et al, 2016).

Silveira (2014) ressalta que, mesmo com a elevada altura da barragem e com a utilização de um material altamente suscetível ao *piping* (silte de origem eólica) como componente do núcleo, também não foram incorporados equipamentos de instrumentação para monitoramento, exceto alguns marcos de deslocamento superficial. Ademais, não foram tomadas as providências

adequadas para selar as falhas e aberturas evidenciadas no *cut off*, o que proporcionou canais de saída para as partículas do solo erodidas.

Uma das principais lições deixadas por essa tragédia foi a importância de voltar a atenção para a vulnerabilidade das barragens quanto à erosão interna. Esse aprendizado pôde ser contemplado por meio de uma declaração no ano seguinte ao acidente, emitida em memorando, do então presidente dos Estados Unidos Jimmy Carter para os chefes dos órgãos federais envolvidos na segurança de barragens. O documento incluía uma diretiva que: “Os seguintes itens devem ser investigados: os meios de inclusão de novos métodos tecnológicos em estruturas e procedimentos existentes; o quanto a análise probabilística ou análise baseada no risco é incorporada no processo de seleção, projeto, construção e operação.” (FEMA, 2015).

### 3 ANÁLISE DE RISCO

A análise de risco consiste na avaliação das consequências de um evento e da sua possibilidade de ocorrer. Essa ferramenta pode ser útil sobretudo quando não se tem formulação matemática para o problema, como é o caso de rupturas por piping. Nesse capítulo esse conceito será detalhado e exemplificado.

#### 3.1 DEFINIÇÕES

De acordo com FEMA (2015), pode-se dizer que a análise de risco é a primeira parte de um processo de duas etapas. Nessa primeira fase, a equipe técnica estima as probabilidades dos eventos e, em seguida, calcula as probabilidades e as consequências para cada modo de falha, bem como a estimativa do risco total pelo produto desses dois fatores. O risco comumente é mensurado por meio de gráficos que relacionam a probabilidade anual de falhas em função do número de perdas, contudo diversos critérios internacionais limitam a probabilidade anual aceitável ao valor de  $1E-04$ , como apresentado em USBR (2011).

A segunda fase desse processo envolve a participação de gerentes e demais responsáveis, que interpretam os resultados e decidem qual curso de ação tomar. Logo, as informações de risco podem ser mais uma ferramenta de tomada de decisão, assim como códigos e estatutos, boas práticas, julgamentos de especialistas, dados da empresa e valores sociais (HARTFORD e BAECHER, 2004). Segundo declarado nas Diretrizes Federais para Segurança de Barragens dos EUA (*Federal Guidelines for Dam Safety*): “nas barragens existentes, uma análise baseada no risco deve ser considerada no estabelecimento de prioridades para examinar e reabilitar as barragens, ou para melhorar sua segurança.” (FEMA, 2015).

A análise de risco pode ser qualitativa (avaliações subjetivas) ou quantitativa (valores numéricos de probabilidade e custos de reparação das consequências). Para Bando *et al.* (2015), em uma análise quantitativa da árvore de falhas, utilizamos as relações básicas da probabilidade que estão relacionadas com os conectivos lógicos. Desta forma, a relação de união entre dois eventos  $P(X1 \cup X2)$  é dada pela Equação 3.1 e a relação de interseção  $P(X1 \cap X2)$  pela Equação 3.2:

$$P(X1 \cup X2) = P(X1) + P(X2) - P(X1 \cap X2) \quad (3.1)$$

Sendo:

$P(X1)$  e  $P(X2)$  as probabilidades de ocorrência dos eventos  $X1$  e  $X2$  da árvore de falhas;

$P(X1 \cap X2)$  a probabilidade de interseção dos eventos  $X1$  e  $X2$ .

$$P(X1 \cap X2) = P(X1).P(X2|X1) \quad (3.2)$$

Sendo:

$P(X1)$  a probabilidade de ocorrência do evento  $X1$ .

$P(X2|X1)$  a probabilidade condicional de ocorrer o evento  $X2$  dado que ocorreu o evento  $X1$ .

Alguns resultados dentro da teoria de probabilidade auxiliam no cálculo da probabilidade de falha do evento topo:

(i) Se os eventos  $X1$  e  $X2$  são mutuamente exclusivos, então  $P(X1 \cap X2) = 0$  e temos pela Equação 3.1 que  $P(X1 \cup X2) = P(X1) + P(X2)$ . Logo, tem-se a Equação 3.3:

$$P(X1 \cup X2 \cup \dots \cup Xn) = P(X1) + P(X2) + \dots + P(Xn) \quad (3.3)$$

Sendo:

$P(X1)$  e  $P(X2)$  as probabilidades de ocorrência dos eventos  $X1$  e  $X2$  da árvore de falhas;

$P(Xn)$  a probabilidade de ocorrência do evento “n”.

(ii) Se os eventos  $X1$  e  $X2$  não são mutuamente exclusivos, mas são independentes, então  $P(X2|X1) = P(X2)$ , assim  $P(X1 \cap X2) = P(X1).P(X2)$ . Logo, tem-se a Equação 3.4:

$$P(X1 \cap X2 \cap \dots \cap Xn) = P(X1).P(X2) \dots P(Xn) \quad (3.4)$$

Sendo:

$n$  o número de eventos da árvore;

$P(X1 \cap X2 \cap \dots \cap Xn)$  a probabilidade de interseção dos eventos de 1 a  $n$ ;

$P(X1)$  e  $P(X2)$  as probabilidades de ocorrência dos eventos  $X1$  e  $X2$  da árvore de falhas;

$P(Xn)$  a probabilidade de ocorrência do evento “n”.

(iii) Pela lei De Morgan, se os eventos não são mutuamente exclusivos, mas são independentes, tem-se a Equação 3.5:

$$P(X1 \cup X2 \cup \dots \cup Xn) = 1 - \sum_{i=1}^n (1 - P(Xi)) \quad (3.5)$$

Sendo:

$n$  o número de eventos da árvore;

$P(X1 \cup X2 \cup \dots \cup Xn)$  a probabilidade de união dos eventos de 1 a  $n$ ;

$P(Xi)$  a probabilidade de ocorrência do evento “i”.

### 3.2 MÉTODOS

A seguir serão explicitados três dos métodos de análise de risco que, segundo Caldeira (2008) são os mais utilizados em Geotecnia.

- FTA (*Fault Tree Analysis*)

Segundo Hartford e Baecher (2004), a análise por Árvore de Falhas é uma técnica, qualitativa ou quantitativa, que identifica, organiza e representa esquematicamente condições e fatores que podem contribuir para a ocorrência de determinado evento indesejado. O FTA é um método de análise dedutiva, que caminha do geral ao específico, muito utilizado em análises pós-acidente.

A Figura 8 apresenta um exemplo de Árvore de Falhas.

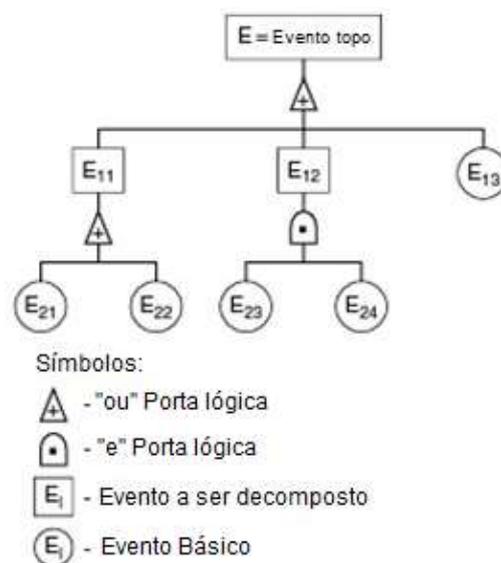


Figura 8: Diagrama de árvore de falhas com representação de portas lógicas (modificado - ZHANG et al., 2016).

- ETA (*Event Tree Analysis*)

Segundo declarado pela ICOLD (2017), a Análise por Árvore de Eventos tem sido usada por uma série de organizações desde a década de 90, incluindo o Bureau de Reclamações dos Estados Unidos (USBR), o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), além de algumas organizações da Austrália.

Caracterizada por apresentar uma sequência lógica, essa é uma técnica, qualitativa ou quantitativa, utilizada para identificar possíveis resultados dada a ocorrência de um evento inicial. Logo, o ETA é um tipo indutivo de análise cuja pergunta chave é “O que acontece se...” (HARTFORD e BAECHER, 2004). A Figura 9 apresenta, de acordo com Caldeira (2008), um exemplo de uma árvore de eventos de um sistema constituído por duas barragens em cascata, em que se pretende avaliar a possibilidade de ruptura por galgamento da barragem a jusante,

provocada pela contribuição do evento iniciador (intensa precipitação atmosférica), da falha na comporta do vertedor e do galgamento da barragem de montante.

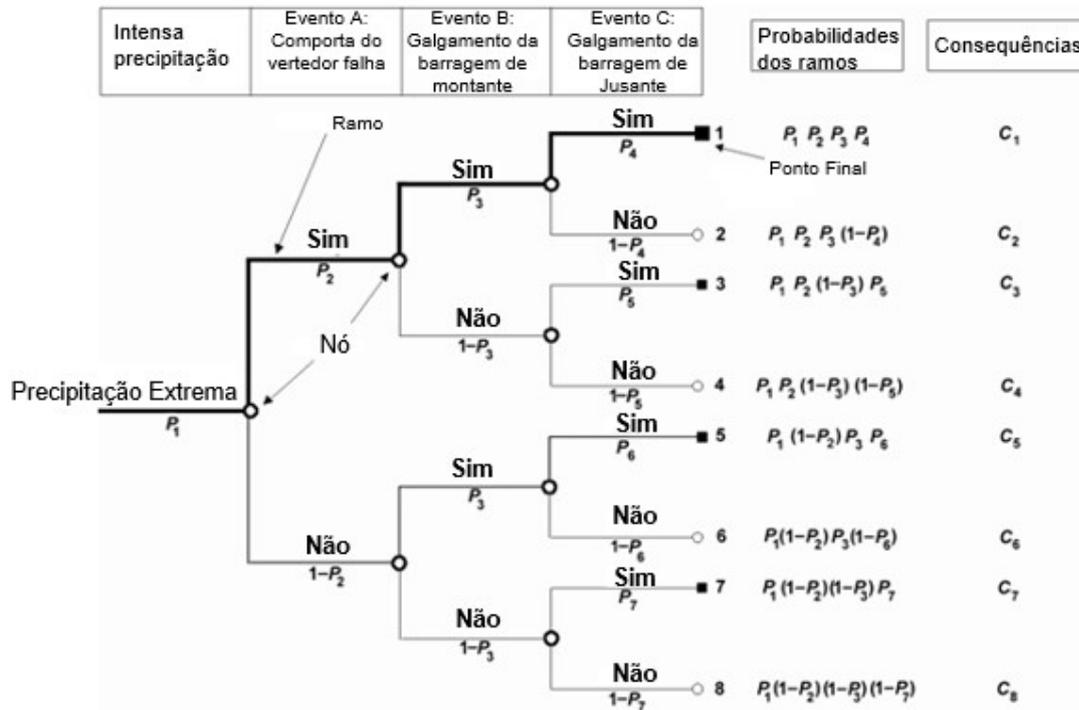


Figura 9: Modelo de árvore de eventos (modificado - HARTFORD e BAECHEER, 2004).

Nas sequências acima, representadas pelas ramificações, cada evento terá uma resposta “sim” ou “não”, embora também existam sistemas em que estão presentes estados de resposta múltipla (CALDEIRA, 2008). Em uma análise de risco quantitativa, cada “sim” terá sua probabilidade de ocorrência atribuída, e cada “não” terá sua probabilidade de não ocorrência, dada pelo complemento da probabilidade atribuída à respectiva resposta “sim”.

- FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*)

De acordo com Caldeira (2008), a Análise dos Modos de Falha e Seus Efeitos é uma técnica que considera os diversos modos de falha de um dado elemento e determina seus efeitos em outros componentes e no sistema global. Assim, os modos de ruptura são ordenados, de acordo com vários aspectos, para juntos comporem o relatório final do FMEA. A análise é descritiva (qualitativa) e a informação é normalmente disposta em tabela.

Este método pode demandar muito tempo e recursos quando se trata de um sistema complexo, como aplicações de segurança de barragens, já que as falhas e suas causas correspondentes são

variadas, múltiplas e inter-relacionadas (ZHANG *et al.*, 2016). A Figura 10 apresenta um esquema do método.

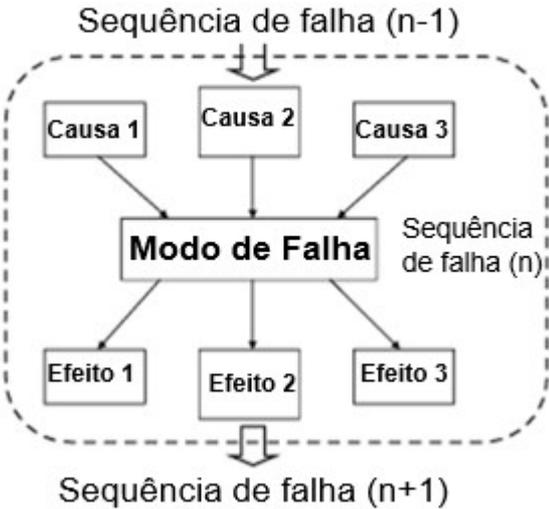


Figura 10: Diagrama sequencial de um modo de ruptura do método FMEA (ZHANG *et al.*, 2016).

## 4 O PROCESSO DE *PIPING*

O processo de *piping* pode ser dividido em quatro etapas, sendo elas: iniciação, continuação, progressão e abertura da brecha.

### 4.1 INICIAÇÃO

Quatro são os mecanismos através da qual pode ser iniciada uma erosão interna: fluxo concentrado, erosão regressiva, erosão de contato e sufusão, como exemplificado na Figura 11.

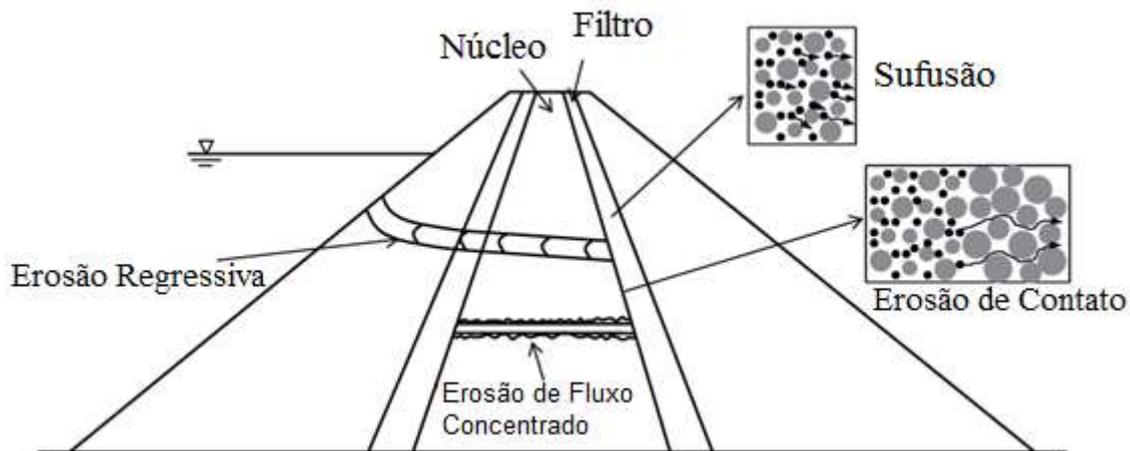


Figura 11: Mecanismos de iniciação de *piping* (modificado - ZHANG *et al.*, 2016).

- Fluxo concentrado

O fluxo concentrado é o modo de iniciação de *piping* mais comum de acordo com as ocorrências de rompimento de barragens. Esse tipo de mecanismo tende a ocorrer em caminhos preferenciais da barragem, ou seja, por intermédio de fissuras e aberturas já existentes (ZHANG *et al.*, 2016).

Conforme afirmam FEMA (2015) e ICOLD (2017), suas causas são derivadas, sobretudo, de recalques diferenciais, de fraturas hidráulicas devido a baixas tensões e de ressecamentos. Outrossim, esses caminhos podem ainda ser causados por descontinuidades geológicas, pela ação de animais ou da vegetação local, por interrupções no período de aterramento da barragem, pela ação de tremores.

- Erosão regressiva

De acordo com FEMA (2015), a erosão regressiva consiste num processo erosivo no qual o carregamento de partículas se inicia em um ponto de saída de fluxo, a superfície livre, de forma que a erosão ocorra regressivamente, ou seja, no sentido de jusante para montante. Se as

condições geológicas das barragens possibilitarem o aumento excessivo de poropressões, os gradientes hidráulicos na saída do fluxo podem aumentar o suficiente para iniciar a erosão regressiva.

Existem duas formas de erosão regressiva, conforme descrito por Silva (2016): a erosão regressiva tubular e a erosão regressiva global. No primeiro caso, o túnel ou tubo de erosão formado (por onde são carregadas as partículas) é essencialmente horizontal e formado por uma camada de solo coesivo. Já na erosão regressiva global, o solo não é capaz de sustentar um longo túnel. Assim, são formados curtos tubos de erosão regressiva, que colapsam sucessivamente resultando em uma erosão generalizada.

- Erosão de contato

Segundo ICOLD (2017), a erosão de contato ocorre quando uma camada de solo de partículas graúdas se encontra em contato direto com outra de grãos miúdos, e, além disso, o escoamento ocorre na camada de solo graúdo, em direção paralela à interface entre camadas, como representado na Figura 12. Desta forma, as partículas de solo fino são desestabilizadas e transportadas para os poros presentes na camada de solo graúdo.

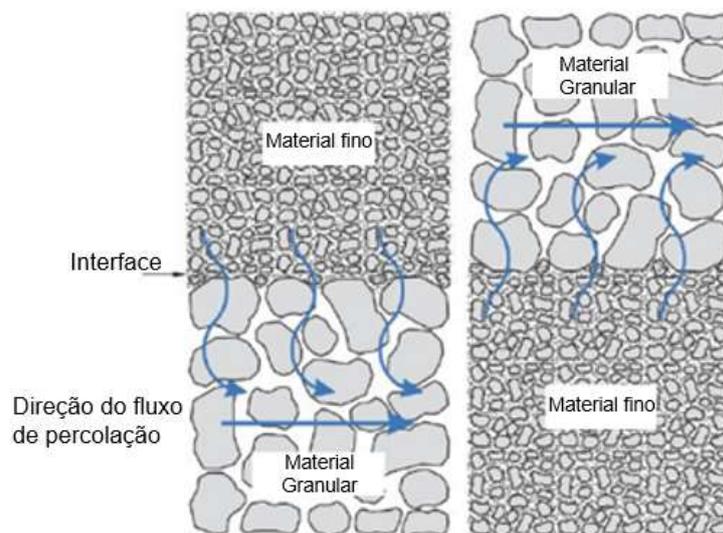


Figura 12: Esquema de solo sujeito à erosão de contato (USACE, 2015).

Sendo um assunto ainda recente na literatura, para alguns autores, como FEMA (2015), a erosão de contato é considerada uma espécie de erosão por fluxo concentrado.

- Sufusão

De acordo com ICOLD (2017), a sufusão é uma forma de erosão interna de solos instáveis que envolve a erosão de partículas finas contidas em uma matriz granular. Desta forma, as partículas finas são carregadas pelo fluxo de água por entre as partículas graúdas, as quais não são movimentadas e passam a suportar a maior parte das tensões efetivas do solo.

Desta forma, os grãos miúdos devem ser suficientemente pequenos para que caibam nos poros presentes entre as partículas grossas. Ademais, a quantidade de partículas finas não deve superar aquela necessária para preencher os espaços vazios da camada graúda, e a velocidade do fluxo de água deve ser alta o bastante para conseguir mover as partículas finas (FELL *et al.*, 2008). Assim, solos de graduação grosseira ou aberta são mais suscetíveis a sufusão (FEMA, 2015).

## 4.2 CONTINUAÇÃO

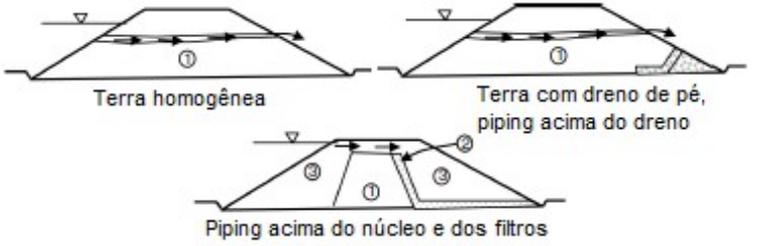
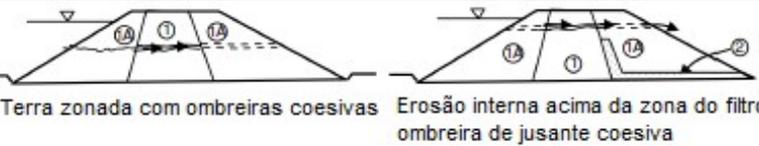
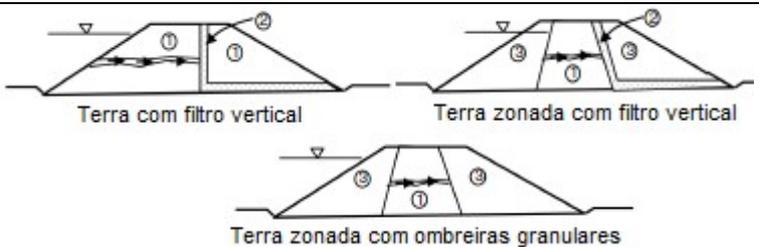
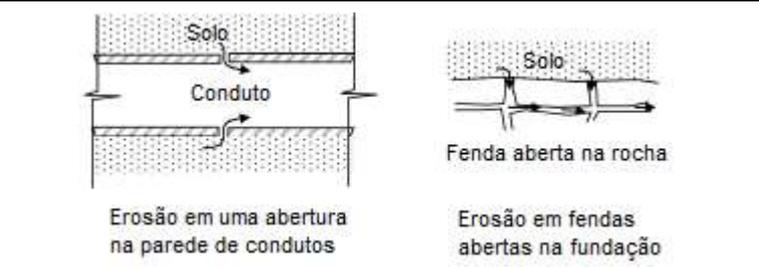
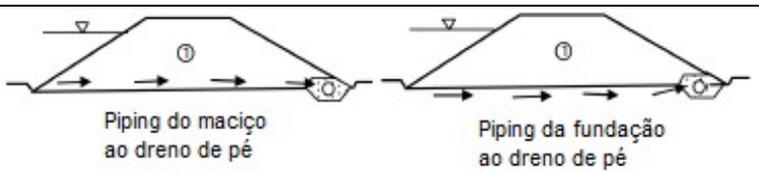
Uma vez iniciada, a erosão interna terá prosseguimento a não ser que as forças erosivas sejam reduzidas ou a passagem de partículas seja impedida, o que pode ser feito com o uso de filtros e de zonas de transição (ICOLD, 2017). Logo, a continuação do *piping* depende da capacidade dessas ferramentas de interromper o processo, motivo pelo qual seu dimensionamento deve ser criterioso.

Na sequência são apresentados os cinco critérios básicos de dimensionamento de filtros apresentados por Caldeira (2008):

- Retenção: os filtros devem ser suficientemente finos para reter parte das partículas de maior dimensão do solo de base.
- Permeabilidade: os filtros devem ser suficientemente grosseiros para permitir a percolação da água, evitando elevadas pressões e elevados gradientes hidráulicos.
- Uniformidade: a granulometria dos filtros deverá ser suficientemente uniforme para não sofrer segregação durante seu manuseio.
- Auto estabilidade: a fração mais grosseira dos filtros deve respeitar o critério de retenção em relação à sua fração mais fina.
- Material granular: os filtros devem ser majoritariamente granulares para que não haja fissuração devido à cimentação.

Há uma série de cenários de continuação da erosão interna que podem ser aplicáveis dependendo do zoneamento da barragem e do modo de falha em consideração (FELL *et al.*, 2008), tais como os dispostos na Tabela 4.

Tabela 4: Cenários de continuação do *piping* (modificado - FELL *et al.*, 2008).

Cenários	Exemplos
<p>Cenário 1: Barragem homogênea, sem filtros de interceptação total.</p>	 <p>Terra homogênea</p> <p>Terra com dreno de pé, piping acima do dreno</p> <p>Piping acima do núcleo e dos filtros</p>
<p>Cenário 2: Talude de jusante composto por material fino coesivo, capaz de sustentar um tubo.</p>	 <p>Terra zonada com ombreiras coesivas</p> <p>Erosão interna acima da zona do filtro, ombreira de jusante coesiva</p>
<p>Cenário 3: Há um filtro ou uma camada de transição a jusante do núcleo, ou um talude de jusante que não é capaz de sustentar um tubo.</p>	 <p>Terra com filtro vertical</p> <p>Terra zonada com filtro vertical</p> <p>Terra zonada com ombreiras granulares</p>
<p>Cenário 4: <i>Piping</i> em uma trinca ou fenda.</p>	 <p>Solo</p> <p>Conduto</p> <p>Erosão em uma abertura na parede de condutos</p> <p>Solo</p> <p>Fenda aberta na rocha</p> <p>Erosão em fendas abertas na fundação</p>
<p>Cenário 5: <i>Piping</i> em um dreno de pé</p>	 <p>Piping do maciço ao dreno de pé</p> <p>Piping da fundação ao dreno de pé</p>

FEMA (2015) ressalta que apenas a consciência de que os filtros devem ser previstos em projeto não necessariamente os garantem adequado desempenho. Tanto o projeto quanto a implantação dos filtros são fundamentais para garantir o cumprimento de suas funções.

### 4.3 PROGRESSÃO

Tendo as zonas de transição e os filtros falhados em suas funções de interromper a erosão interna, ou sejam eles inexistentes, o processo poderá progredir se forem atendidas as condições hidráulicas e mecânicas necessárias (ICOLD, 2017).

Segundo Fell *et al.* (2015), a erosão por vazamento concentrado e por erosão regressiva, a erosão desencadeia para o desenvolvimento do tubo erosivo. Na sufusão nenhum tubo é

formado, mas a permeabilidade do solo pode ser aumentada significativamente. Já na erosão de contato, a erosão do solo mais fino por entre o solo mais grosso continua podendo, em casos particulares, levar ao desenvolvimento de um túnel.

Nos casos em que há a formação de tubos, a progressão do processo depende se o solo através do qual o tubo é formado suportará mantê-lo aberto; se o fluxo será limitado por uma contração ou uma zona a montante; ou se o solo mais a montante obstruirá o tubo (FELL *et al.*, 2015). Quanto aos mecanismos de iniciação de erosão interna que não necessariamente requerem a formação de um tubo, não há prática comumente aceita para avaliação da progressão (FEMA, 2015).

#### **4.4 ABERTURA DA BRECHA**

Nessa circunstância, todo o processo de erosão interna foi concluído e as tentativas de detecção e de intervenção falharam, tais como as apresentadas pela ICOLD (2017):

- Descer o nível do reservatório usando comportas de vertedouros ou válvulas de descarga;
- Instalar poços de alívio de pressão na fundação do aterro;
- Construção de filtros reversos sobre áreas em que o material erodido está emergindo da fundação do aterro;
- Construção de bermas de equilíbrio;
- Despejo de material granular no lado de montante das cavidades existentes, para tentar bloqueá-las.

Assim, a ruptura da barragem poderá ocorrer por um dos modos representados na Figura 13.

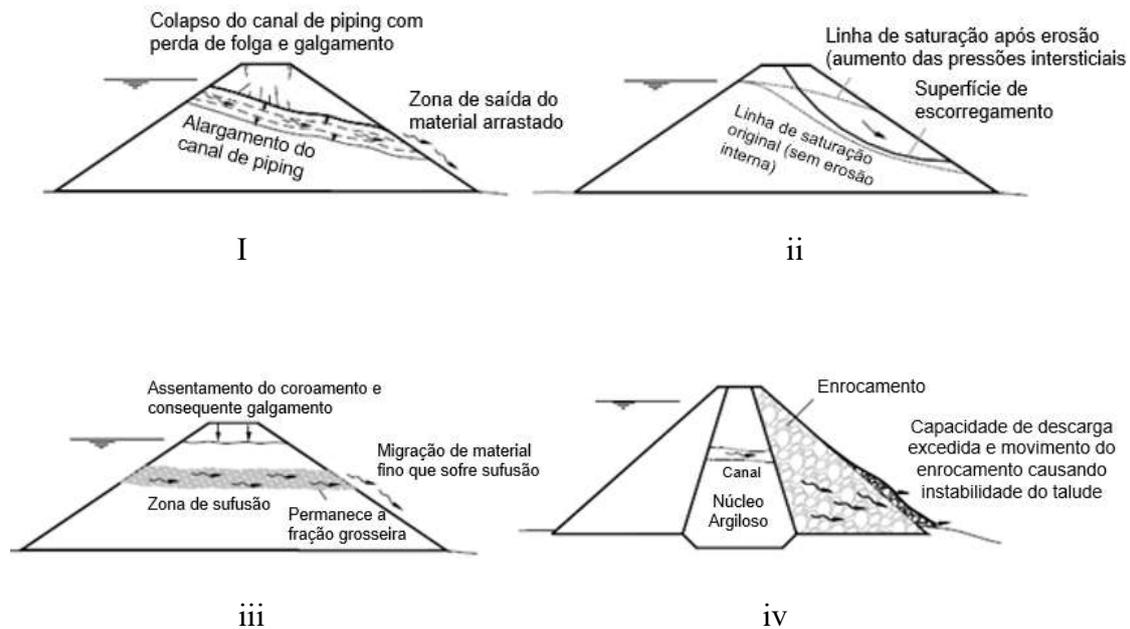


Figura 13: i- alargamento excessivo de um canal de *piping*, ii – instabilidade do talude de jusante, iii – galgamento por assentamento do coroamento, iv – destacamento de material do talude de jusante (modificado - CALDEIRA e SANTOS, 2008).

O alargamento excessivo de um tubo de erosão (caso i) representa um aumento no diâmetro do canal de *piping*. Segundo FEMA (2015), no caso “ii” a formação da brecha se dá pelo fato da erosão interna poder causar altas poropressões na fundação ou aterro, resultando na redução da resistência ao cisalhamento. Para USACE (2015), o mecanismo do caso “iii” refere-se à criação de uma cavidade no aterro que provoca o assentamento da crista da barragem, rebaixando-a para um nível menor do que o observado no reservatório (perda de borda livre). Já o caso “iv” do mecanismo de formação de brecha por destacamento de material do talude de jusante, segundo Caldeira e Santos (2008), envolve uma erosão progressiva da superfície do talude de jusante na zona de saída do escoamento, em situações em que a encosta não é capaz de suportar o canal de *piping*.

## 5 METODOLOGIA

A seguir serão apresentadas as duas metodologias de análise de risco utilizadas para o cálculo da probabilidade de ruptura do modo de erosão interna.

### 5.1 METODOLOGIA VALE

A metodologia de VALE (2015), baseada nas principais referências sobre o tema, tem por objetivo calcular a probabilidade de ruptura de barragens para os quatro principais modos de ruptura. Como o presente trabalho aborda a ruptura de barragens por *piping*, optou-se pela utilização dessa metodologia para mensurar qualitativa e quantitativamente os valores de probabilidade de ruptura para essa modalidade.

A árvore de eventos para o tipo de falha da erosão interna está representada na Figura 14 e será a base para a aplicação do modelo. Salienta-se que essa metodologia considera apenas o mecanismo final de falha de “alargamento do tubo”, por ser o mais comum de acordo com estatísticas de ruptura de barragens.

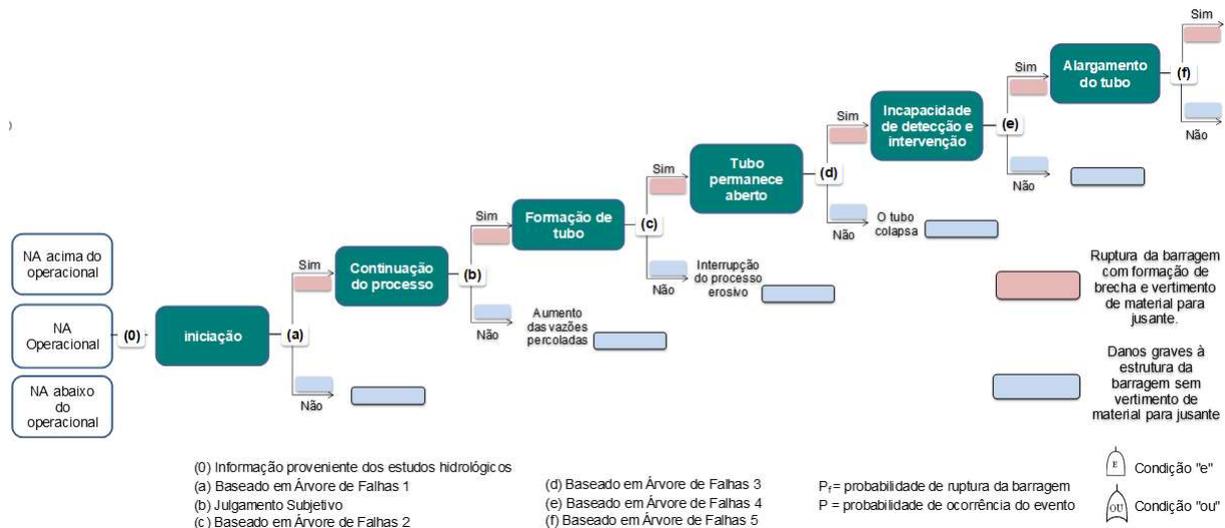


Figura 14: Árvore de eventos padronizada para o modo de falha de erosão interna – mecanismo final de falha de alargamento do tubo (VALE, 2015).

A sequência genérica de eventos utilizada para o modo de falha de erosão interna contempla os seguintes nós:

- (0) - nível do reservatório;
- (a) – iniciação;
- (b) – continuação;

- (c) – progressão (formação do tubo);
- (d) – progressão do tubo (tudo permanece aberto);
- (e) – detecção e intervenção;
- (f) – formação do mecanismo de falha.

A cada um dos nós são designadas árvores de falhas e tabelas de referência contendo fatores de influência, bem como suas respectivas probabilidades de ocorrência descritas como: virtualmente certo, mais provável, bastante provável, neutro e pouco provável. Essas descrições estarão ligadas a um valor probabilístico conforme a Tabela 5, tornando a análise quantitativa. Caso não haja informações suficientes para julgar determinado fator de influência, deve-se escolher a categoria neutra.

Tabela 5: Chance de ocorrência do fator de influência em termos descritivos e o seu equivalente valor de probabilidade (VALE, 2015).

<b>Descrição verbal</b>	<b>Probabilidade equivalente</b>
Virtualmente impossível	0,01
Pouco provável	0,15
Neutro	
Não se tem informação sobre as chances do evento ocorrer ou as chances de ocorrência são iguais.	0,50
Bastante provável	0,70
Mais provável	0,85
Virtualmente certo	0,99

A forma de calcular as probabilidades dos ramos das árvores de falhas depende de como os fatores são relacionados pelas portas lógicas “e” ou “ou”. A condição “e” é calculada multiplicando a probabilidade de cada elemento, já condição “ou” é calculada a partir da lei De Morgan, apresentada primeiramente na Equação 3.5.

As árvores e tabelas da metodologia são específicas para a localização de ocorrência do fenômeno, podendo ser no maciço, do maciço para a fundação ou na fundação. A continuidade da metodologia será específica para a erosão interna do maciço para a fundação.

No primeiro nó da árvore de falha são apresentadas informações a respeito do nível do reservatório para, assim, deduzir as demais etapas do processo. Se a erosão interna for possível de acontecer no nível d’água (NA) operacional do reservatório ou acima, deve-se atribuir a probabilidade máxima para esse nó. Quando não existirem as informações necessárias, pode-se considerar que a erosão interna será capaz de iniciar com o reservatório no NA operacional.

O processo de obtenção da probabilidade da etapa de iniciação é descrito pela Figura 15, em que estão relacionados os fatores de influência mais relevantes para o nó (a).

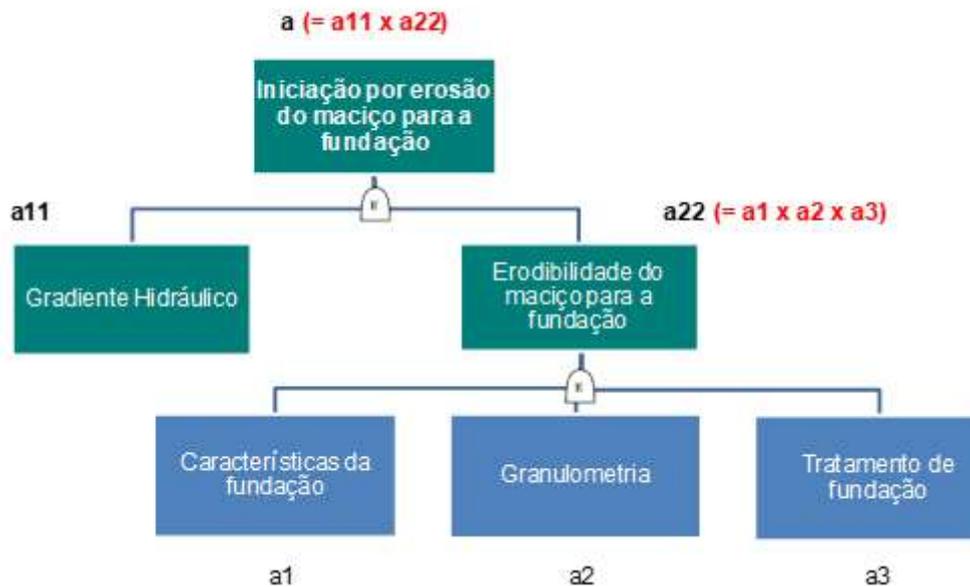


Figura 15: Árvore de falhas para a modalidade de iniciação do maciço para a fundação (VALE, 2015).

O nó (b), referente à etapa da continuação, não dispõe de árvore de falha, uma vez que esta conta com apenas um fator de influência, sendo ele a existência de um filtro no ponto de saída da percolação. Ou seja, a metodologia assume que somente um sistema de drenagem eficiente conseguiria impedir a continuação do processo. Já a fase de formação do tubo da progressão é influenciada por dois fatores principais, os quais buscam avaliar a habilidade do material ao longo do fluxo em suportar um canal erosivo, como apresentado na Figura 16.

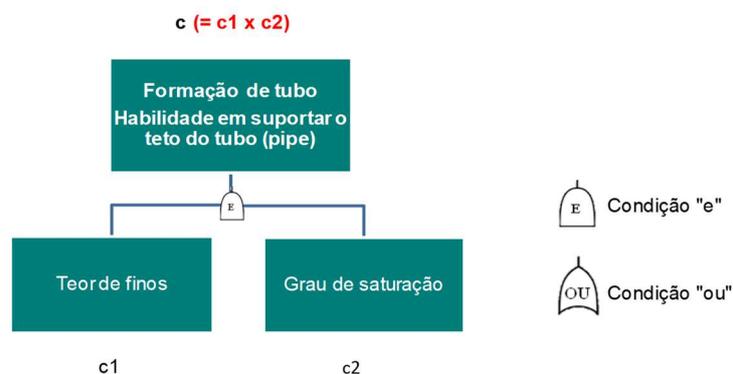


Figura 16: Árvore de falhas para formação de tubo - habilidade em suportar um teto (VALE, 2015).

No nó (d) procura-se averiguar a persistência da progressão, sabendo que essa persistirá se o tubo permanecer aberto. Para essa análise, vale a árvore de falhas expressa na Figura 17.

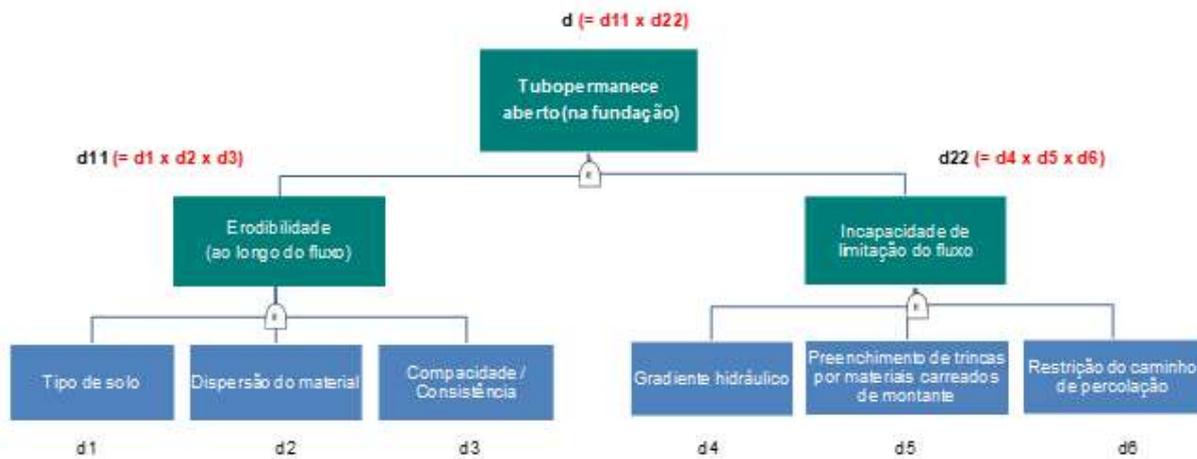


Figura 17: Árvore de falhas para a progressão - tubo permanece aberto (VALE, 2015).

A incapacidade de detectar e intervir na barragem para evitar a sua ruptura - nó (e) - tem seus fatores de influência apresentados na Figura 18. A efetividade do ambiente de controle (e11), em que são levadas em conta a organização e a tecnologia do ambiente, leva em consideração a possibilidade de não detectar o risco geotécnico em tempo suficiente para sua neutralização antes da ruptura da barragem. Já a capacidade de intervenção (e22) busca comprovar que, quanto mais rápida for a evolução do processo, menores serão as chances para intervenções corretivas, embora elas possam ser maiores em locais de fácil acesso e se houver um Plano de Ação Emergencial (PAE).

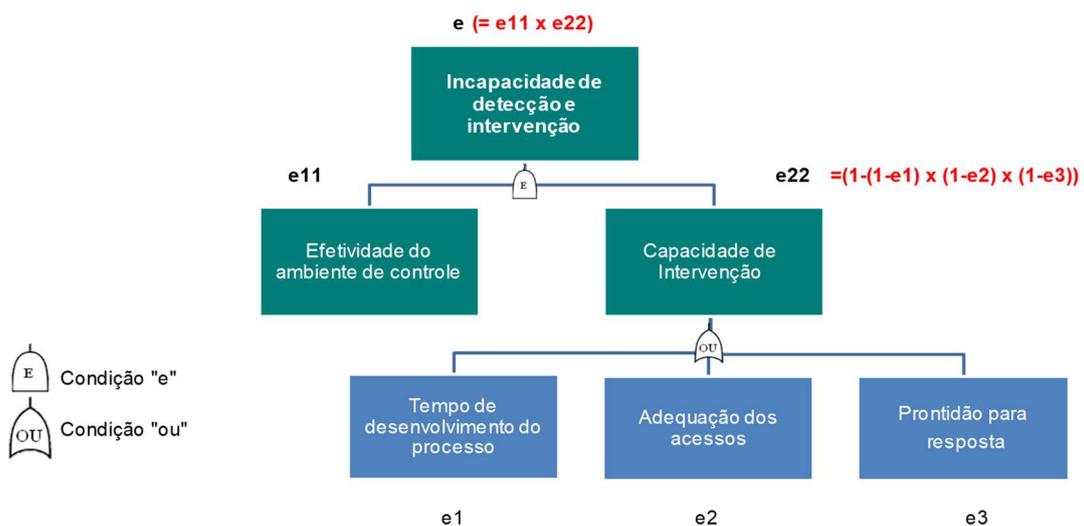


Figura 18: Árvore de falhas sobre a incapacidade de detecção e intervenção (VALE, 2015).

Como dito anteriormente, o único mecanismo final de falha considerado pela metodologia da VALE é o alargamento do tubo. Assim, a Figura 19 serve para calcular a probabilidade da formação desse mecanismo no nó (f).

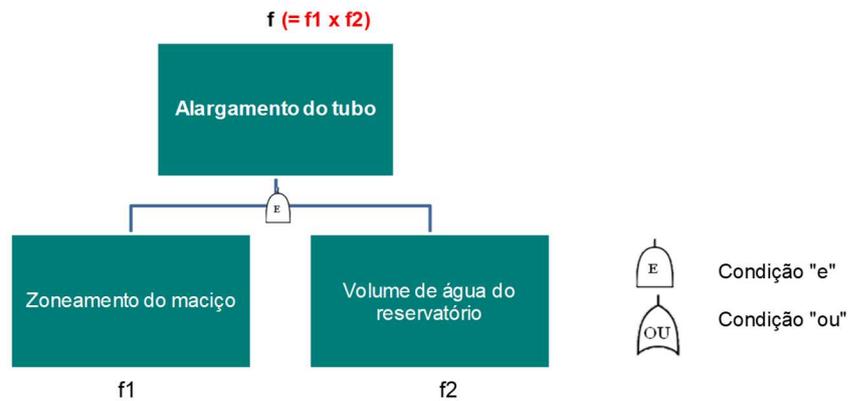


Figura 19: Árvore de falhas para o mecanismo de falha de alargamento do tubo (VALE, 2015).

## 5.2 METODOLOGIA *PIPING TOOLBOX*

A metodologia de Fell *et al.* (2008), conhecida como *Piping Toolbox*, apresenta um procedimento mais elaborado, o qual busca avaliar de forma quantitativa especificamente o modo de falha de erosão interna. A quantificação da falha é feita pelo uso de árvores de eventos e as probabilidades condicionais sugeridas são suportadas por dados históricos e pelo julgamento da equipe de desenvolvimento do *Piping Toolbox*. Essa equipe contava com as seguintes organizações: Universidade de Nova Gales do Sul (UNSW), Bureau de Reclamação dos Estados Unidos (USBR), Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) e Serviço de Pesquisas Unidas (URS).

A árvore de eventos modelo para a estimativa da probabilidade de ruptura por *piping* está apresentada Figura 20, em que “IMx” significa mecanismo de iniciação número “x”. Estes são divididos por região, sendo de 1 a 23 direcionados ao *piping* no maciço, de 24 a 27 ao *piping* na fundação, e 28 e 29 válidos para a modalidade que se origina no maciço e desponta na fundação em rocha ou em solo, respectivamente. Logo, embora essa metodologia também apresente procedimentos direcionados para as outras regiões, será apresentada aquela aplicada à erosão interna do maciço para a fundação.

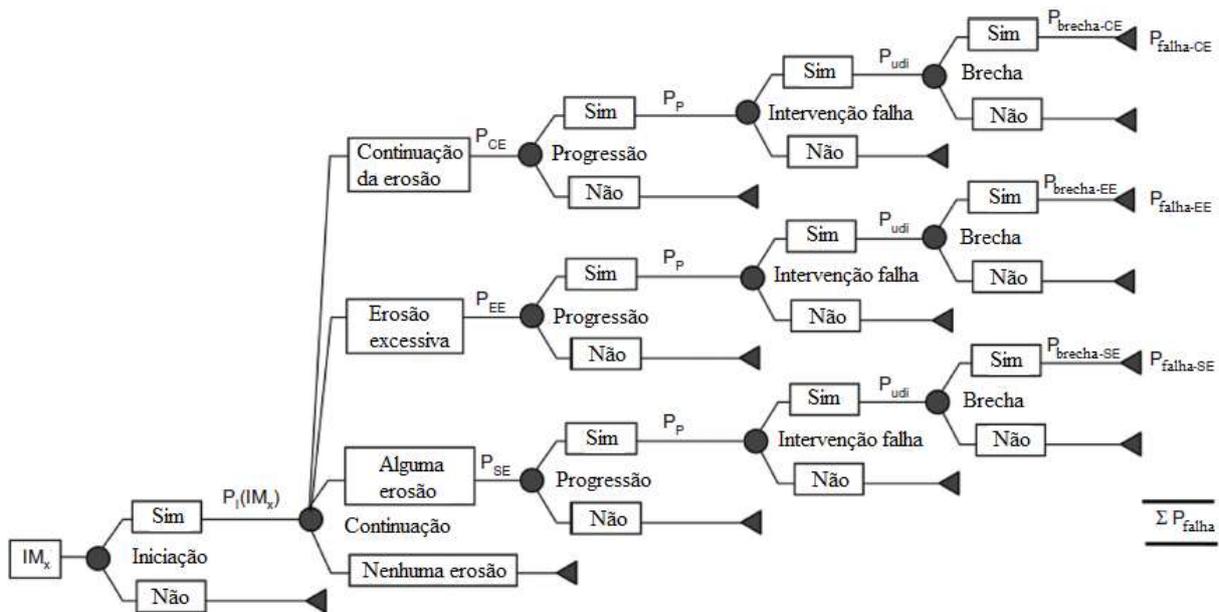


Figura 20: Árvore de eventos para estimativa da probabilidade de ruptura (modificado – FELL *et al.*, 2015).

O mecanismo de iniciação válido para fundações em rocha (IM28) busca calcular a probabilidade de um caminho contínuo para a erosão do núcleo na fundação. Isso requer juntas abertas na rocha ou solos grosseiros na base ou nas laterais da trincheira de corte. Para os casos em que um *cut off* não está presente, a questão é se a erosão pode ocorrer ao longo do contato núcleo-fundação. Esse mecanismo considera que a erosão interna pode ser iniciada por:

- Erosão regressiva ou sufusão em uma zona de alta permeabilidade no núcleo ou trincheira de corte.
- Lavagem do material do núcleo no contato núcleo-fundação pelo fluxo de água nas discontinuidades da fundação rochosa.
- Erosão em uma fratura hidráulica devido ao arqueamento de um *cut off* estreito.

O método para avaliar a probabilidade de início da erosão nessas características tem uma etapa em comum e outra que depende da forma de iniciação. São elas, respectivamente:

(a) Avaliar, a partir dos dados disponíveis, a probabilidade de ocorrência de uma via contínua de discontinuidades em solos rochosos ou de granulação grossa ( $P_{path}$ ) na base ou nas laterais da trincheira ou do contato núcleo-fundação. Isso deve ser avaliado a partir dos seguintes fatores: geologia da fundação, mapeamento e fotografias tiradas durante a construção, registros de grauteamento, profundidade da fundação geral e da escavação de corte, tratamento realizado nas paredes e no chão da vala de corte. Em muitos casos, ficará evidente nesta fase que há pouca

ou nenhuma probabilidade de tais características estarem presentes e a probabilidade de canalização para a fundação pode ser avaliada como insignificante.

A probabilidade desse mecanismo deve ser avaliada primeiramente calculando a probabilidade de haver descontinuidades conectadas na rocha de fundação ( $P_{CR}$ ), a depender do processo geológico considerado. Deve-se calcular  $P_{CR}$  apenas para descontinuidades maiores do que 5 mm de largura, já que para defeitos e características menores do que 5 mm se presume que eles estão presentes ( $P_{CR} = 1,0$ ), a menos que haja evidências muito detalhadas demonstrando o contrário. Deve-se considerar ainda que o tratamento na base de corte do aterro pode não evitar o contato do núcleo com aberturas da fundação, o que é feito calculando  $P_{TI}$ . Assim,  $P_{path}$  será dado pela Equação 5.1:

$$P_{path} = P_{CR} \times P_{TI} \quad (5.1)$$

Sendo:

$P_{CR}$  a probabilidade de haver descontinuidades conectadas na rocha de fundação;

$P_{TI}$  a probabilidade do tratamento na base de corte do aterro não evitar o contato do núcleo com aberturas da fundação.

(b) Calcular a probabilidade de iniciação ( $P_I$ ) por erosão regressiva ou sufusão, por lavagem do material ou por fratura hidráulica, respeitando as Equações 5.2, 5.3 e 5.4, respectivamente:

$$P_I = P_{path} \times P_e \quad (5.2)$$

$$P_I = P_{path} \times P_{IC} \quad (5.3)$$

$$P_I = P_{path} \times P_{hf} \times P_{IC} \quad (5.4)$$

Sendo:

$P_e$  uma probabilidade associada ao mecanismo de iniciação de erosão regressiva ou sufusão;

$P_{hf}$  uma probabilidade associada aos seus processos de iniciação de fratura hidráulica;

$P_{IC}$  uma probabilidade associada ao gradiente hidráulico médio na zona em análise, à largura da fissura e às propriedades do solo.

A primeira etapa para calcular a probabilidade de continuação ( $P_{CE}$ ) consiste em avaliar qual dos cinco cenários apresentados na Tabela 4 mais de adequa à seção da barragem e ao caminho de falha considerado. Em seguida, deve-se seguir os passos apresentados na Tabela 6, em que alguns cenários é também possível estimar a probabilidade de haver alguma erosão ( $P_{SE}$ ), de haver erosão em excesso ( $P_{EE}$ ) ou de não haver *piping* ( $P_{NE}$ )

Tabela 6: Probabilidade de continuação da erosão interna (FELL *et al.*, 2008).

Cenário	Probabilidade ( $P_{NE}$ , $P_{SE}$ , $P_{EE}$ , $P_{CE}$ )
1	Não há possibilidade de filtração; $P_{CE} = 1,0$ ; $P_{NE} = P_{SE} = P_{EE} = 0$
2	Não ocorrerá filtração se a zona de alta permeabilidade persistir ao longo do talude de jusante Estimar $P_{CE}$ ; $P_{NE} = 1,0 - P_{CE}$ ; $P_{SE} = P_{EE} = 0$
3	Estimar $P_{CE}$ , $P_{NE}$ , $P_{SE}$ e $P_{EE}$
4	1º: Avaliar o tamanho da abertura da fissura que permitiria a continuação do <i>piping</i> ( $JOS_{CE}$ ) 2º: Estimar a probabilidade condicional para $P_{CE}$ pela estimativa da proporção de solos mais grosseiros do que $JOS_{CE}$
5	Estimar $P_{CE}$ . A avaliação da erosão interna em um dreno de pé considera o estado do mesmo (observada através de vídeo ou inspeções), além do seu design e detalhes de construção

Quanto à ocorrência de *piping* do maciço para a fundação, deve-se aplicar os critérios válidos para o Cenário 4, a fim de avaliar se as aberturas na rocha da fundação são suficientemente abertas e contínuas.

A probabilidade de progressão ( $P_P$ ) é dada pelo produto de três fatores determinados por tabelas: probabilidade do solo suportar o teto de um tubo de *piping* ( $P_{PR}$ ); probabilidade da abertura ser preenchida, mas não cessar o processo de erosão ( $P_{PC}$ ); e probabilidade de que o fluxo não seja restringido pela zona de montante ( $P_{PL}$ ).

Fell *et al.* (2008) afirma que a probabilidade de uma intervenção ou reparo serem bem-sucedidos depende do tempo desde quando o processo de erosão interna pode ser detectado até quando a brecha é formada. Além disso, Fell *et al.* (2008) afirma que Fell *et al.* (2001, 2003), com base no histórico de acidentes por *piping* e no conhecimento dos processos físicos, forneceu orientações sobre a estimativa do tempo de progressão, ou seja, do momento em que um fluxo concentrado é observado pela primeira vez ao rompimento de uma barragem. Esses entendimentos também são aplicados na metodologia do *Piping Toolbox*, por isso as probabilidades atribuídas nessa etapa relacionam-se apenas ao mecanismo de fluxo concentrado. A estimativa de falha da intervenção ( $P_{no}$ ) é dada pela Equação 5.5:

$$P_{no} = P_{nol} + [(1 - P_{nol}) \times (P_{nd}) + (1 - P_{nol}) \times (1 - P_{nd}) \times P_{ui}] \quad (5.5)$$

Sendo:

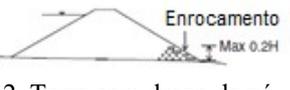
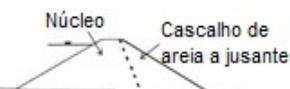
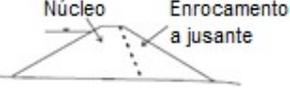
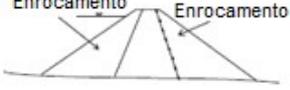
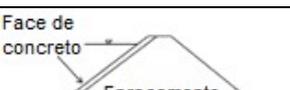
$P_{nol}$  a probabilidade de uma erosão concentrada não ser observável;

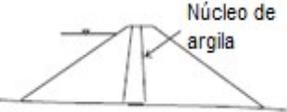
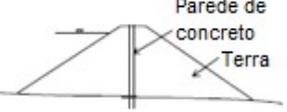
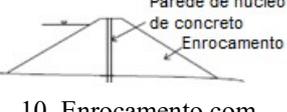
$P_{nd}$  a probabilidade de uma erosão concentrada não ser detectada;

$P_{ui}$  a probabilidade de uma erosão concentrada não ser efetivamente reparada.

Para obtenção da probabilidade de abertura da brecha (Pbr) deve-se, primeiramente, observar na Tabela 7 quais mecanismos considerar, a depender do tipo de seção da barragem.

Tabela 7: Seleção dos mecanismos de violação por erosão interna (modificado - FELL *et al.*, 2015).

Tipo de zoneamento da barragem	Alargamento do tubo	Instabilidade de taludes	Assentamento da crista da barragem	Desestruturação do talude de jusante
 <p>0. Homogênea</p>	✓*	✓	Excluir, exceto se o talude de jusante for não coesivo	✓
 <p>1. Terra com filtro</p>	✓*	✓	Excluir, exceto se o talude de jusante for não coesivo	✓
 <p>2. Terra com drenagem de pé de enrocamento</p>	✓*	✓	Excluir, exceto se o talude de jusante for não coesivo	✓
 <p>3. Zonada de terra</p>	Excluir, exceto se o talude de jusante puder suportar um tubo	✓	Excluir, exceto se o talude de jusante for não coesivo	✓
 <p>4. Zonada de terra e enrocamento</p>	Excluir, exceto se o talude de jusante puder suportar um tubo	✓	✓*	✓
 <p>5. Enrocamento com núcleo central de terra</p>	Excluir, exceto se o talude de jusante puder suportar um tubo	Excluir, exceto se a barragem existente tem estabilidade marginal	✓*	✓
 <p>6. Terra com face de concreto</p>	✓	✓*	Excluir, exceto se o talude de jusante for não coesivo	✓
 <p>7. Enrocamento com face de concreto</p>	Excluir	Excluir, exceto se a barragem é de cascalho ou tem baixa permeabilidade	✓*	Excluir

	✓*	✓	Excluir, exceto se o talude de jusante for não coesivo	✓
8. Terra com núcleo de argila				
	Excluir	✓*	Excluir, exceto se o talude de jusante for não coesivo	✓
9. Terra com parede central				
	Excluir	Excluir, exceto se a barragem existente tem estabilidade marginal	✓*	✓
10. Enrocamento com parede central				
	Excluir, exceto se o talude de jusante puder suportar um tubo	✓	✓*	✓
11. Aterro hidráulico				

Notas: ✓ Mecanismo de formação de brecha deve ser incluso na estimativa de probabilidade.

✓\* Mecanismo de formação de brecha deve ser incluso na estimativa de probabilidade e normalmente é o mais crítico.

Em seguida, prossegue-se com a estimativa das probabilidades de falha, em que a probabilidade total se dará pela lei De Morgan das Equações 3.5 e 5.6:

$$P_{br} = 1 - [(1 - P_{ge}) \times (1 - P_{si}) \times (1 - P_{sf}) \times (1 - P_{un})] \quad (5.6)$$

Sendo:

$P_{ge}$  a probabilidade de falha por alargamento do tubo de erosão interna;

$P_{si}$  a probabilidade de falha por instabilidade de taludes;

$P_{sf}$  a probabilidade de falha por assentamento da crista da barragem;

$P_{un}$  a probabilidade de falha por desestruturação do talude de jusante.

### 5.2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAGENS

A primeira barragem analisada foi a barragem de Teton. Acredita-se que seu principal mecanismo de abertura da brecha tenha sido o de alargamento do tubo, por isso a análise foi feita apenas para este. Ademais, dentre os mecanismos de iniciação do método *Piping Toolbox*, utilizou-se o que simula a lavagem do material no contato núcleo-fundação pelo fluxo de água nas descontinuidades da fundação rochosa, por ser o que melhor representa o ocorrido.

O aterro contava com cinco regiões diferentes, sendo uma delas o núcleo central (Zona 1) como pode ser verificado na Figura 21. Os dados dessa barragem foram retirados do relatório elaborado pela junta de especialistas responsáveis por rever a causa da falha da barragem de Teton, em Independent Panel (1976).

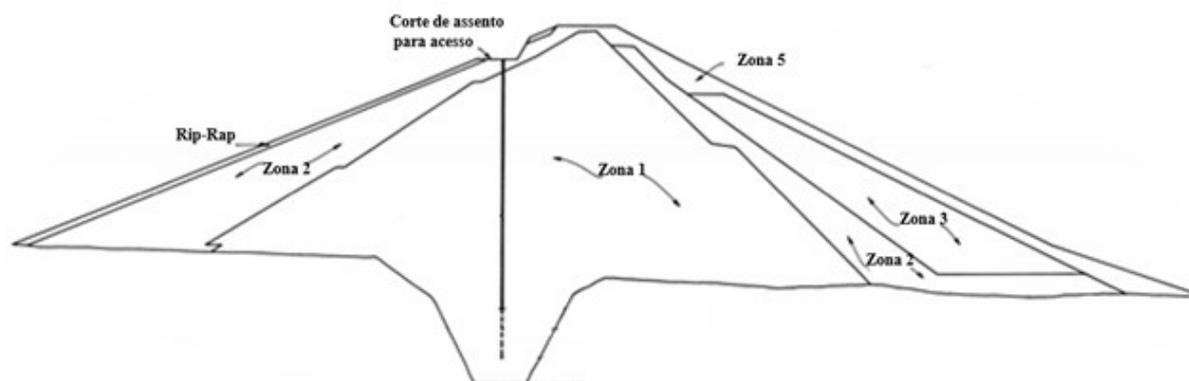


Figura 21: Seção transversal da barragem de Teton subdividida em regiões de diferentes materiais (modificado - INDEPENDENT PANEL, 1976).

O material de preenchimento da Zona 1 foi o utilizado em todas as etapas dessa análise, pois admitiu-se o *piping* como certo se o fluxo de percolação atingisse a permeável rocha de fundação. A Tabela 8 revela as propriedades físicas de amostras representativas retiradas do remanescente material de preenchimento da trincheira, localizado sobre a parede direita e classificado como CL-ML, de acordo com a classificação unificada dos solos. Já a propriedade de consistência foi obtida pela Equação 5.7.

Tabela 8: Propriedades físicas de amostras do material remanescente sobre parede direita do *cut off*.

Propriedade	Média	Faixa de valores
Limite de Liquidez	26,4	23-31
Índice de Plasticidade	3	0-11
Teor de água	22	14-32
Percentual de filer <sup>(c)</sup>	80	55-95

(a) O número de amostras testadas para cada propriedade foi de aproximadamente 150.

(b) Amostras classificadas usualmente como ML, e ocasionalmente como CL.

(c) Material retido na peneira N° 200.

$$IC = \frac{LL - w}{IP} \quad (5.7)$$

Sendo:

LL o limite de liquidez;

IP o índice de plasticidade;

w o teor de água.

Quanto à fundação, esta era composta por uma rocha de elevado grau de fraturamento, como pode ser verificado na Figura 22.

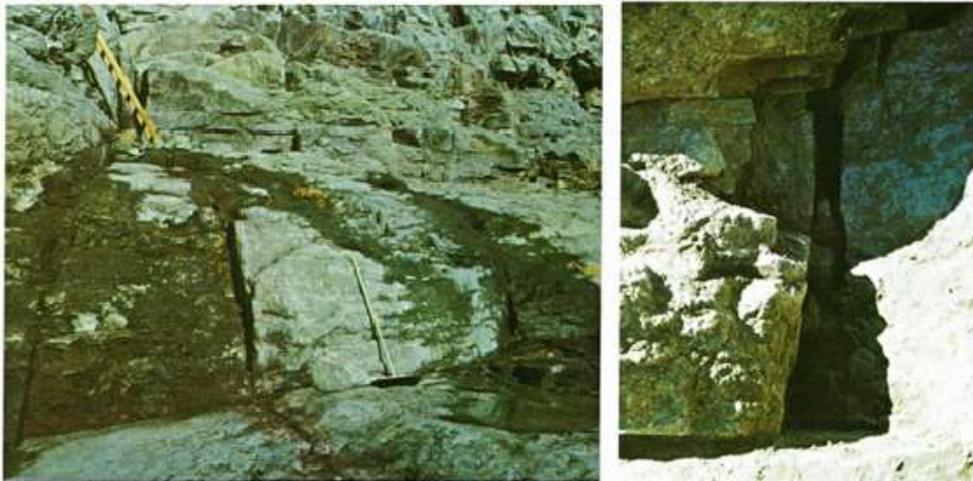


Figura 22: Fotografias da rocha de fundação, com destaque para uma abertura de 51mm a direita (INDEPENDENT PANEL, 1976).

A segunda barragem analisada foi a Barragem X, a qual possui altura máxima de 45 m e uma extensão da crista de 550 m. O empreendimento está em funcionamento desde o começo da década de 70 e sua finalidade é o armazenamento e abastecimento de água para a população. O barramento é formado por um maciço compactado homogêneo, com filtro vertical e drenos horizontais, além de estruturas anexadas de concreto e tomada d'água. A barragem também é composta por rip-rap e camada de transição a montante do maciço, o qual é constituído por argilas de três jazidas, compondo cinco regiões diferentes como demonstrado na Figura 23.

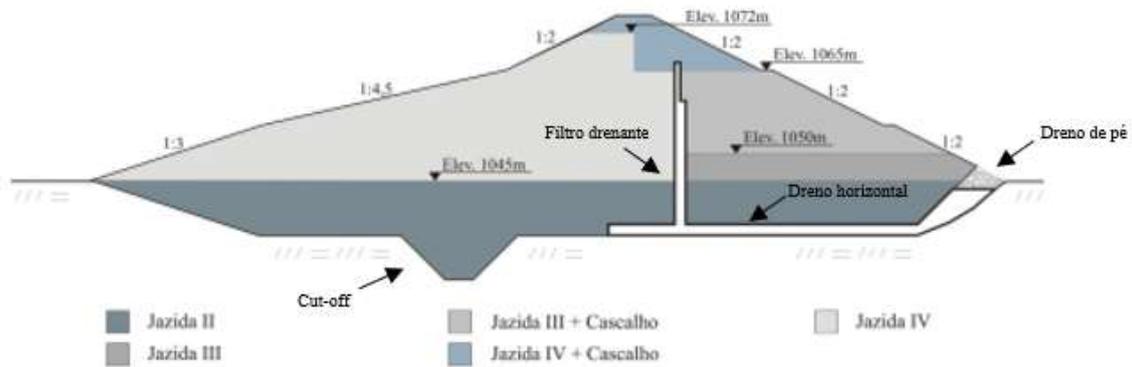


Figura 23: Seção transversal da Barragem X em regiões de diferentes materiais (modificado - PERINI, 2009)

O material utilizado nessa análise foi o solo, classificado como CL-ML, da Jazida II, cujas propriedades físicas de amostras representativas estão apresentadas na Tabela 9. Os dados de referência foram retirados do relatório final da construção da barragem, em Geotécnica (1971).

Tabela 9: Valores médios do material de amostragem da Jazida II.

wc	LL	IP	% Pedregulho	% Areia	% Silte	% Argila
22,3	41,2	16,7	2,1	21,0	32,6	44,0

Da mesma forma que na barragem de Teton, na análise da Barragem X pelo método *do Piping Toolbox*, utilizou-se, para efeito de comparação, a forma de iniciação que simula a lavagem do material do núcleo no contato núcleo-fundação e o mecanismo de abertura da brecha de alargamento do tubo.

## 6 RESULTADOS

Nesse capítulo foram realizadas as análises utilizando as duas metodologias apresentadas. Primeiramente foi avaliada a barragem de Teton e posteriormente a Barragem X.

### 6.1 BARRAGEM DE TETON

#### 6.1.1 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA *PIPING TOOLBOX*

- Iniciação

Com o auxílio de testes investigativos e observando as condições geológicas locais, foram utilizadas a Figura 24 e a Tabela 10 na obtenção de  $P_{CR}$ , em que as descrições mais adequadas estão sublinhadas (como será feito para destacar as demais classificações).

A partir das fotografias da Figura 22, já é possível perceber o elevado grau de faturamento da rocha de fundação. A conectividade dessas aberturas foi avaliada pela realização de ensaios de perda d'água na investigação pós ruptura, em que foram perfurados poços de observação em locais selecionados. Nos resultados dos ensaios realizados na parede direita da trincheira, foram identificados elevados valores de perda d'água em alguns furos, sendo o maior equivalente a 12,7 gpm (aproximadamente 23 L/min/m/atm para um furo de 10 ft e 10 psi), uma perda considerada muito alta segundo Sandroni (2006), pela Tabela 11. Assim o ensaio, cujo resultado está disposto no Anexo A, revelou que a água poderia passar livremente através da rocha em vários locais nas proximidades da cortina de injeção. Quanto ao ambiente geológico, o método classifica a rocha de fundação em questão (riolito) na categoria mais provável. Assim, o valor de  $P_{CR}$  adotado foi de 0,7.

Apesar do método recomendar que o procedimento seja feito para três faixas de larguras, nesse caso de 5 a 25 mm, de 25 a 100 mm e para larguras maiores que 100 mm, utilizou-se apenas a categoria de 25 a 100 mm por abranger as fissuras mais críticas encontradas, de até 76 mm, segundo Eikenberry *et al.* (1980).

Tabela 10: Fatores de influência na probabilidade de caminhos contínuos na rocha de fundação ( $P_{CR}$ ) - (FELL *et al.*, 2008).

Fator	Fator de importância relativa (RF)	Fator de probabilidade (LF)			
		Menos provável (1)	Neutro (2)	Mais provável (3)	Muito mais provável (4)

<b>Investigações, monitoramento e dados de construção indicando fraturas geológicas, abertas ou preenchidas, estão/ não estão presentes</b>	(2)	Bons dados da investigação e da construção indicam que fraturas deste tamanho são muito improváveis	Dados da investigação e da construção indicam evidências circunstanciais de que fraturas deste tamanho são improváveis	Dados da investigação e da construção <sup>(b)</sup> indicam evidências circunstanciais de que fraturas deste tamanho estão presentes	<u>Bons dados da investigação, do monitoramento e da construção <sup>(a)</sup> e indicam que fraturas deste tamanho estão presentes</u>
<b>Continuidade espacial das fraturas geológicas <sup>(c)</sup></b>	(2)	Os dados não mostram nenhuma fratura alinhada espacialmente na direção montante-jusante	Os dados mostram isoladas fraturas alinhadas na direção montante-jusante	Os dados mostram algumas ou uma única fratura parcialmente alinhada na direção montante-jusante	<u>Os dados mostram muitas ou uma única fratura alinhada na direção montante-jusante</u>
<b>Ambiente geológico suscetível a apresentar fraturas contínuas, abertas ou preenchidos</b>	(2)	A geologia regional e local da barragem indica que essas características geológicas são muito improváveis de estarem presentes	A geologia regional e local da barragem indica que essas características geológicas são improváveis de estarem presentes	<u>A geologia regional e local da barragem indica que essas características geológicas são prováveis de estarem presentes</u>	A geologia regional e local da barragem indica que essas características geológicas são conhecidas ou muito prováveis de estarem presentes

Notas (a) Exemplos: registros/fotografias de escavações, túneis e poços de observação, elevadas perdas d'água em perfurações, elevada absorção de graute.

(b) Exemplos: elevadas perdas d'água em perfurações, alta taxa de infiltração na fundação da barragem, elevada absorção de graute, baixos níveis piezométricos nos espaldares.

(c) Os dados incluem as informações observadas nas notas (a) e (b).

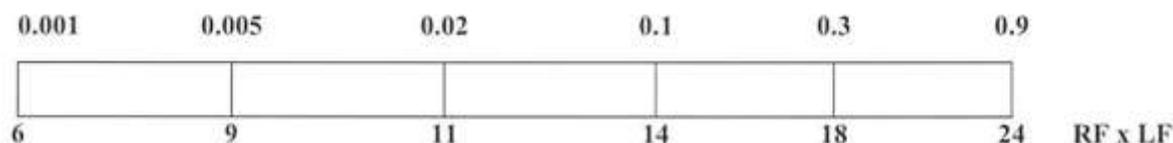


Figura 24:  $P_{CR}$  versus  $\sum RF \times LF$  (FELL *et al.*, 2008).

Tabela 11: Classificação da taxa de perda em ensaios de perda d'água (SANDRONI, 2006).

<b>Denominação</b>	<b>Perda de água (L/min/m/atm)</b>	<b>Absorção de cimento (kg/m)</b>
Baixa a nula	Menor que 1	Menor que 10
Média	1 a 8	10 a 50
Alta	8 a 20	50 a 100
Muito alta	Maior que 20	Maior que 100

Em seguida, adotou-se valor de 0,6 para  $P_{TI}$  utilizando a Tabela 12, e o valor de  $P_{path}$  pôde então ser calculado pela Equação 5.1, o qual foi igual a 0,42.

Tabela 12: Probabilidade do tratamento do *cut off* não impedir o contato do núcleo com aberturas da fundação ( $P_{TI}$ ) – barragem de Teton (FELL *et al.*, 2008).

<b>Cenários</b>	<b>Probabilidade do tratamento não prevenir o contato</b>
Evidência bem documentada de que não houve tratamento do <i>cut off</i>	1,0
Não há registros de construção, concepção e organização da construção não conhecidos ou <u>conhecidos, mas provavelmente não foi dada muita atenção a inspeção de fundações e realização de tratamentos de superfície</u>	0,3 a 0,9
Não há registros de construção, mas sabe-se que a prática do projeto e da autoridade da construção determinavam a inspeção das fundações e realização o tratamento de superfície	0,1 a 0,5
Evidências de que as fundações foram mapeadas, mas não em detalhes. Algumas evidências de que as fraturas foram cobertas com concreto	0,05 a 0,2
Evidências bem documentadas de que as fundações foram cuidadosamente mapeadas e todos os defeitos foram cobertos com pelo menos 100 mm de concreto de boa qualidade, ou que eles foram limpos em uma profundidade de pelo menos 3 vezes a largura da superfície e tratados com concreto dentado	0,01 a 0,1

Como dito anteriormente, a probabilidade de iniciação por *piping* será dada pela Equação 5.3, que teve a variável  $P_{IC}$  obtida com o auxílio da Tabela 13, uma vez que esta é válida para o tipo de solo do núcleo. Observa-se que, para elevados valores de gradiente,  $P_{IC}$  é igual a 1 independente da largura de fissura adotada. Assim, como estima-se que o gradiente hidráulico no momento do acidente tenha atingido valores entre 7 e 10, conforme apresentado por Seed e Duncan (1981), adotou-se  $P_{IC}$  igual a 1, fazendo com que  $P_I$  assumisse o mesmo valor de  $P_{path}$ .

Tabela 13: Estimativa da probabilidade de iniciação a partir de uma fissura para solos CL-ML – barragem de Teton (FELL *et al.*, 2008).

Largura estimada da fissura do núcleo para o nível de reservatório considerado (mm)	Probabilidade de iniciação para diferentes valores de gradiente ( $P_{IC}$ )					
	Gradiente hidráulico médio					
	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0
1	0,02	0,1	0,4	0,8	0,9	0,95
2	0,1	0,5	0,7	0,9	0,95	1,0
5	0,4	0,8	0,9	0,95	1,0	1,0
10	0,7	0,9	0,95	1,0	1,0	1,0
25	0,9	0,95	1,0	1,0	1,0	1,0
50	0,95	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
75	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

(a) O gradiente é o gradiente hidráulico médio de montante a jusante do núcleo no nível da fissura assumida, para dado nível de reservatório.

- Continuação

Segundo o método, o tamanho da abertura na fundação que dará continuidade ao processo ( $JOS_{CE}$ ) deverá ter valor igual ao  $D_{95}$  do solo adjacente, ou seja, do núcleo. Como a curva granulométrica média a ser utilizada deve ser ajustada para o diâmetro de 4,75 mm, esse foi o valor adotado para  $D_{95}$ , já que a diferença existente entre o valor real e o adotado não alternaria o resultado de  $P_{CE}$ .

Da mesma forma que na etapa de iniciação, foi utilizada a largura crítica de 76 mm como tamanho da fratura aberta na fundação ( $JOS$ ). Assim,  $P_{CE}$  foi obtida a partir da última linha da Tabela 14, a qual apresenta uma faixa de probabilidades. Proporcionalmente, se for atribuída a probabilidade de 0,1 ao valor de  $JOS$  equivalente a  $JOS_{CE}$ , portanto igual a 4,75 mm, a abertura de 76 mm teria uma probabilidade equivalente maior do que 1,0. Logo, como o limite superior para  $P_{CE}$  é de 0,9, esse foi o valor adotado.

Tabela 14: Estimativa da probabilidade de continuação para o cenário 4 ( $P_{CE}$ ) – barragem de Teton (FELL *et al.*, 2008).

Comparação entre $JOS$ e o critério de continuação da erosão	
Fratura aberta na barragem	$P_{CE}$
$JOS < 0,5 \times JOS_{CE}$	0,0001
$JOS < 0,5 \times JOS_{CE}$	0,001
$JOS < 0,5 \times JOS_{CE}$	0,01
$JOS > JOS_{CE}$	0,1 – 0,9

- Progressão

Dos resultados da Tabela 8, observa-se que o teor de filer estava em torno de 80%. Essa característica foi utilizada para a determinação de  $P_{PR}$  pela Tabela 15, cujo valor foi de 1,0.

Tabela 15: Probabilidade de o solo suportar o teto de um tubo de *piping* ( $P_{PR}$ ) – barragem de Teton (FELL *et al.*, 2008).

Classificação do solo	Percentual de finos	Plasticidade de finos	Condição de umidade	Probabilidade de suportar um teto
Argilas, argilas arenosas (CL, CH, CL-CH)	> 50%	Plástico	Úmido ou saturado	1,0
Siltos (ML ou MH)	> 50%	Plástico ou não plástico	Úmido ou saturado	1,0
Areia argilosa, cascalho argiloso (SC, GC)	15% - 50%	Plástico	Úmido ou saturado	1,0
Areias siltosas, cascalhos siltosos, (SM, GM)	> 15%	Não plástico	Úmido	0,7 – 1,0
			Saturado	0,5 – 1,0
			Úmido	0,5 – 1,0
Solos granulares com alguns finos coesivos (SC-SP, SC-SW, GC-GP, GC-GW)	5% - 15%	Plástico	Saturado	0,2 – 0,5
			Úmido	0,05 – 0,1
Solos granulares com alguns finos não plásticos (SM-SP, SM-SW, GM-GP, GM-GW)	5% - 15%	Não plástico	Saturado	0,02 – 0,05
			Úmido e saturado	0,0001
Solos granulares (SP, SW, GP, GW)	< 5%	Não plástico	Úmido e saturado	0,0001
		Plástico	Úmido e saturado	0,001 – 0,01

O método recomenda que a probabilidade de não limitação do fluxo por um elemento a montante ( $P_{PL}$ ) seja igual a 1,0 para casos em que há um *cut off* profundo e uma fundação em rocha, por considerar que a limitação de fluxo será dependente do tamanho das fissuras. Quanto a  $P_{PC}$ , optou-se por adotar um valor intermediário de 0,5, já que não se dispunha de um valor de coeficiente de uniformidade do material do núcleo para melhor avaliar a Tabela 16. Logo, a probabilidade da etapa de progressão foi de 0,5.

Tabela 16 :Probabilidade de um preenchimento não impedir o desenvolvimento do tubo ( $P_{PC}$ ) – barragem de Teton (FELL *et al.*, 2008).

Zoneamento do aterro	Zona granular a montante	Filtro, transição ou outro material granular a jusante	Probabilidade do <i>piping</i> progredir
Homogêneo, terra com dreno de pé, terra com dreno horizontal, terra com núcleo de argila, terra com parede central, aterro hidráulico	Nenhuma, exceto pelo rip rap e filtros sob estes	Nenhum ou não efetivo	1,0
Terra com drenos verticais e horizontais, terra zonada	Nenhuma	Presente	1,0

<u>Núcleo de terra central ou inclinado e enrocamento</u>	<u>Presente</u>	<u>Presente</u>	<u>0,1 a 0,9 – Se o núcleo é bem graduado, contendo grãos de areia de finos a grossos (0,075 – 4,75 mm)</u>
			0,01 a 0,1 – Se o núcleo é deficiente em partículas de areia e demais materiais que ajudam a vedar a zona a jusante

- Detecção, intervenção e reparação

Entende-se que a principal deficiência do programa de vigilância durante o enchimento do reservatório foi na instrumentação. Embora uma atenção considerável tenha sido dada à medição de poços nas proximidades do reservatório, nenhum piezômetro foi instalado para monitorar especificamente o comportamento do aterro. Portanto, as inspeções diárias que buscavam detectar possíveis surgências eram feitas apenas visualmente.

Com as Tabelas de 16 a 18 e a Figura 25 é possível obter as probabilidades citadas na Equação 5.5. Utilizado nas Tabelas 17 e 18, o tempo entre a primeira aparição do fluxo concentrado e a formação da brecha de ruptura não foi estimado por não haver valores precisos de gradiente hidráulico ao longo do tubo. Desta forma, adotou-se um valor intermediário.

Tabela 17: Fatores que influenciam a probabilidade de um fluxo concentrado não ser observável (P<sub>no</sub>) – barragem de Teton (FELL *et al.*, 2008).

Fator	Fator de importância relativa (RF)	Fator de probabilidade (LF)			
		Menos provável (1)	Neutro (2)	Mais provável (3)	Muito mais provável (4)
Um fluxo concentrado pode ser observado no pé da barragem?	(3)	Fundação de baixa permeabilidade: fluxo emerge no pé e Quando não há vegetação ou há apenas uma grama rala no pé, a observação é facilitada	<u>Fundação de baixa permeabilidade: fluxo emerge no pé e/ou Vegetação no pé da barragem ofusca a observação do vazamento</u>	Fundação de média permeabilidade: fluxo permanece na fundação e não emerge no pé e/ou Vegetação densa no pé torna difícil a observação do vazamento	O nível d'água a jusante afoga parte ou todo o pé da barragem, ou fundação permeável: fluxo não emerge no pé e Vegetação densa no pé torna difícil a observação do vazamento

Zoneamento que influencia se vazamentos emergem na face de jusante do aterro	(2)	Homogêneo, terra com parede central, terra face de concreto	Terra com dreno de pé, zonada de terra, terra com núcleo de argila	<u>Terra com filtros verticais e horizontais, zonada de terra e enrocamento</u>	Aterro com núcleo central, enrocamento com face de concreto, enrocamento com parede central
Instrumentação de fluxos de percolação	(1)	Informações de infiltrações coletadas ou monitoradas em tempo real	Informações de infiltrações parcialmente coletadas	Informações de infiltrações parcialmente coletadas, mas disfarçadas por efeitos da chuva	<u>Não há material para coletar informações de infiltrações</u>

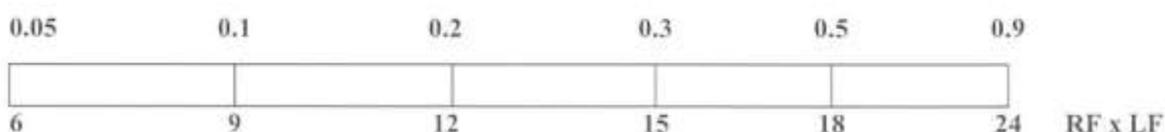


Figura 25: P<sub>nol</sub> versus  $\sum RF \times LF$  (FELL *et al.*, 2008).

Tabela 18: Probabilidade de não detectar a erosão interna (P<sub>nd</sub>) dado o tempo para o desenvolvimento do fluxo concentrado e para ruptura inicial – barragem de Teton (FELL *et al.*, 2008).

Frequência de inspeção e/ou monitoramento	P <sub>nd</sub>					Semanas ou meses
	< 3h	3-12h	<u>12-24h</u>	1-2 dias	2-7 dias	
Mensalmente, sem público próximo	0,999	0,99	0,95	0,9	0,6	0,1
Mensalmente, com público próximo	0,999	0,8	0,5	0,25	0,1	0,05
Semanalmente, sem público próximo	0,99	0,95	0,9	0,7	0,2	0,1
Semanalmente, com público próximo	0,99	0,75	0,5	0,2	0,1	0,05
<u>Diariamente, sem público próximo</u>	0,9	0,6	<u>0,5</u>	0,1	0,05	0,01
Diariamente, com público próximo	0,8	0,5	0,4	0,1	0,05	0,01
Diariamente, com monitoramento em tempo real	0,2	0,15	0,1	0,1	0,05	0,01

Tabela 19: Probabilidade de que, dado que o fluxo concentrado é detectado, a intervenção e o reparo não são bem-sucedidos (Pui) – barragem de Teton (FELL *et al.*, 2008).

<b>Tempo para desenvolvimento do fluxo concentrado e ruptura</b>	<b>O que pode ser feito</b>	<b>Pui</b>
< 3h	O tempo é muito curto para intervir de forma eficiente, independentemente do modo de falha	0,99
3-12h	Na maioria dos casos, será impraticável intervir com sucesso nesse período de tempo. Apenas nos casos em que houver um método direto de intervenção, além de pessoal, equipamento e material disponível, a intervenção será bem-sucedida.	0,9-0,99
<u>12-24h</u>	Em muitos casos, será impraticável intervir com sucesso nesse período de tempo. A intervenção será bem-sucedida somente nos casos em que houver um método direto de intervenção, além de pessoal, equipamento e material disponível; ou quando se tratar de um pequeno reservatório que pode ter seu nível rebaixado	<u>0,85-0,99</u>
1-2 dias	Em muitos casos, será impraticável intervir com sucesso nesse período de tempo. A intervenção será bem-sucedida somente nos casos em que houver um método direto de intervenção, além de pessoal, equipamento e material disponível; ou quando se tratar de um reservatório pequeno ou médio com uma comporta de elevada capacidade de descarga, que poderá proporcionar o rebaixamento do nível do reservatório	0,7-0,95
2-7 dias	Em alguns casos, será possível intervir com sucesso nesse período de tempo. Nos casos em que houver um método direto de intervenção, além de pessoal, equipamento e material disponível; ou quando se tratar de um reservatório pequeno ou médio com uma comporta de elevada capacidade de descarga, permitindo o rebaixamento do nível do reservatório	0,2-0,9 <sup>(a)</sup>
Semanas ou meses	Em alguns casos, será possível intervir com sucesso nesse período de tempo. A intervenção tem grandes chances de ser sucedida quando houver um método direto de intervenção, além de pessoal, equipamento, material disponível e muitos recursos; ou quando se tratar de um reservatório pequeno ou médio com uma comporta de elevada capacidade de descarga, permitindo o rebaixamento do nível do reservatório	0,1-0,8 <sup>(a)</sup>

Notas: (a) Usar valores menores do que 0,5 somente se houver um alto grau de confiança no valor estimado.

Assim, os valores adotados foram de 0,367 para P<sub>noI</sub>, 0,5 para P<sub>nd</sub> e 0,85 para P<sub>ui</sub>, chegando a uma probabilidade de 0,95 para o nó de detecção, intervenção e reparação.

- Abertura da brecha

A Tabela 20 foi utilizada para obtenção da probabilidade de abertura da brecha para o mecanismo de alargamento do tubo, cujo valor foi de 1,0.

Tabela 20: Probabilidade de abertura da brecha pelo alargamento do tubo (Pge) – barragem de Teton (FELL *et al.*, 2008).

Classificação do solo	Melhor índice estimado de taxa de erosão (IHET)	Tempo para o nível do reservatório cair abaixo do nível do tubo	Pge
SM, SC, <u>ML</u> , solos dispersivos	$\leq 3$ 2 - 3	-	<u>1,0</u>
CL, CL-CH, MH ou CH com Limite de Liquidez <65%	4	> 2 dias	0.8 - 0.95
	3 - 5	1 - 2 dias	0.6 - 0.8
		<1 dia	0.3 - 0.6
CH com Limite de Liquidez > 65%	5	> 2 semanas	0.8 - 0.95
	4 - 6	1 - 2 semanas	0.3 - 0.8
		< 1 semana	0.1 - 0.3
CH com Limite de Liquidez <65% ou CH com Limite de Liquidez >65%	6	Suscetível a se auto limitar	0,05 - 0,1

- Probabilidades finais

Um resumo das probabilidades encontradas está apresentado na Tabela 21.

Tabela 21: Resumo das probabilidades encontradas pelo método do *Piping Toolbox* para a barragem de Teton.

Iniciação	P <sub>CR</sub>	0,7
	P <sub>TI</sub>	0,6
	P <sub>IC</sub>	1,0
	P <sub>path</sub>	0,42
	<b>P<sub>I</sub></b>	<b>0,42</b>
Continuação	<b>P<sub>CE</sub></b>	<b>0,9</b>
Progressão	P <sub>PR</sub>	1,0
	P <sub>PL</sub>	1,0
	P <sub>PC</sub>	0,5
	<b>P<sub>P</sub></b>	<b>0,5</b>
Detecção e intervenção	P <sub>noI</sub>	0,367
	P <sub>nd</sub>	0,5
	P <sub>ui</sub>	0,85
	<b>P<sub>no</sub></b>	<b>0,95</b>
Abertura da brecha	<b>P<sub>br</sub></b>	<b>1,0</b>
Probabilidade final	<b>P<sub>f</sub></b>	<b>2E-01</b>

## 6.1.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA VALE

- Nível do reservatório

A barragem rompeu quando o nível do reservatório estava em 1616,0 m. Esse nível era 6,9 m abaixo do nível máximo operacional de 1622,8 m e 84,3 m acima do mínimo de 1531,6 m. Sendo, portanto, a capacidade máxima do reservatório dada pela diferença entre os níveis máximo e mínimo, o nível d'água de 84,3 m representa uma porcentagem de 92,45% do total, valor este que foi adotado para a probabilidade deste nó.

- Iniciação

A Tabela 22 foi utilizada para avaliar a influência do gradiente hidráulico na etapa de iniciação e a Tabela 23 para avaliar as características de erodibilidade do material. Os resultados calculados estão representados na Figura 26.

Tabela 22: Fatores de influência na probabilidade de iniciação de erosão interna: gradiente hidráulico - barragem de Teton (VALE, 2015).

Fator de influência	Virtualmente certo	Mais provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
<b>Gradiente Hidráulico</b>	<u>Presença de surgência de água</u>	Alto	Médio	Baixo	Observou-se uma surgência de água a jusante, próximo ao pé da barragem.

Tabela 23: Fatores de influência na probabilidade de iniciação de erosão interna - erodibilidade do maciço para a fundação - barragem de Teton (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco provável	Justificativa
<b>Características da fundação</b>	<u>Presença de juntas abertas ou solos de granulometria grosseira em contato com o núcleo.</u>	Neutro	Inexistência de juntas abertas ou solos de granulometria graúda na fundação em contato com o núcleo.	Rocha intensamente fraturada.
<b>Granulometria</b>	<u>Falta de compatibilidade da granulometria do maciço com as aberturas existentes na fundação.</u>	Neutro	Compatibilidade da granulometria do maciço com as aberturas existentes na fundação.	Material altamente dispersivo e de baixa coesão devido a sua formação geológica (solo de origem eólica)
<b>Tratamento de fundação</b>	<u>Fundação sem tratamento no contato com o núcleo.</u>	Neutro	Fundação tratada com concreto dental ou filtro entre o núcleo e a fundação.	Fraturas não tratadas ou com preenchimento insuficiente.

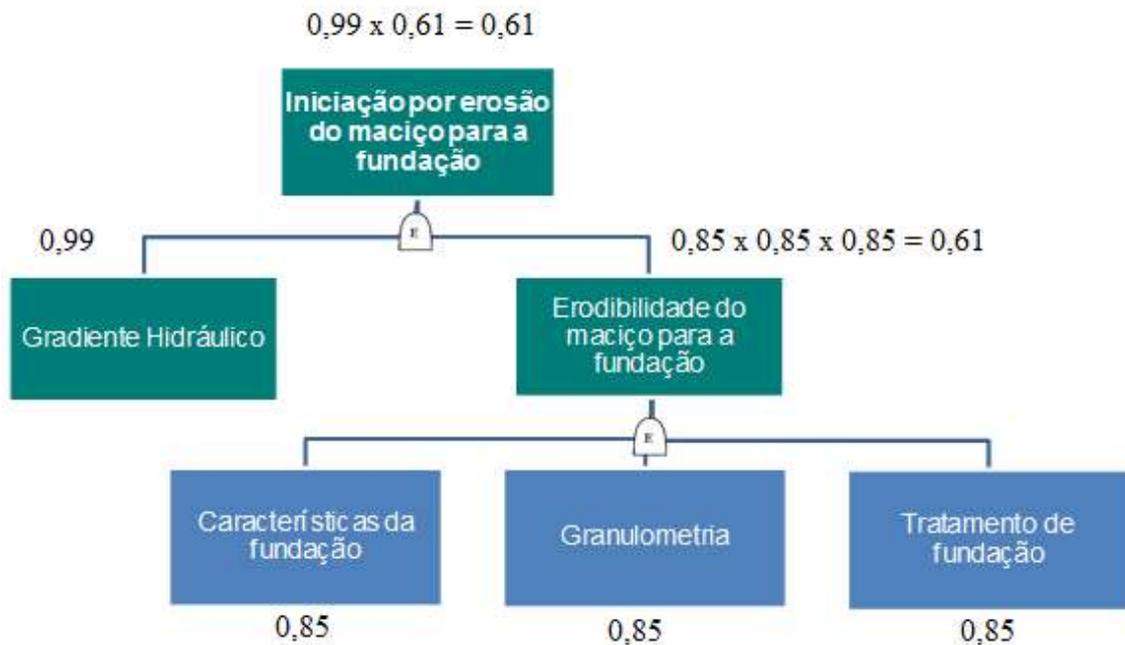


Figura 26: Cálculo da probabilidade de iniciação por erosão do maciço para a fundação – barragem de Teton (modificado – VALE, 2015).

- Continuação

Admitiu-se que as camadas filtrantes vertical e horizontal não eram capazes de interferir na evolução do processo de *piping* do maciço para a fundação. Portanto, a Tabela 24 foi descartada e a probabilidade atribuída a esse nó foi igual a 1,0.

Tabela 24: Fator de influência na probabilidade de continuação do processo - barragem de Teton (VALE, 2015).

Fator de influência	Virtualmente certo	Mais provável	Neutro	Pouco provável	Justificativa
Existência de filtro no ponto de saída da percolação	Ausente ou saída livre	Presente, mas inadequado	Sem informações	Presente e Adequado	Critério não aplicável. Probabilidade igual a 1,0

- Progressão (formação do tubo)

As características desse nó estão representadas na Tabela 25, e na Figura 27 são apresentados os cálculos de probabilidade.

Tabela 25: Fatores de influência na probabilidade de formação de tubo: habilidade de suportar um teto - barragem de Teton (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
<b>Teor de finos</b> (% menor que 0,075mm)	<u>Teor de finos</u> $\geq 15\%$	Teor de finos < 15% e > 5%	Sem finos ou teor de finos < 5%	Teor de filer em torno de 80% (Tabela 8)
<b>Grau de saturação</b>	<u>Parcialmente saturado</u> (primeiro enchimento)	-	Saturado	Barragem rompeu durante seu primeiro enchimento

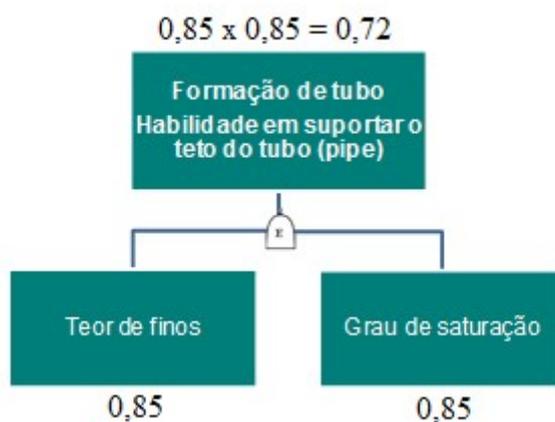


Figura 27: Cálculo da probabilidade de formação de tubo – barragem de Teton (modificado – VALE, 2015).

- Progressão (o tubo permanece aberto)

Primeiramente, analisou-se as condições de erodibilidade do material ao longo do fluxo através da Tabela 26, em que o índice de consistência foi calculado pela Equação 5.7. Em seguida, a incapacidade de limitação do fluxo foi obtida pela Tabela 27.

Tabela 26: Fatores de influência na probabilidade de progressão do tubo: erodibilidade da fundação ao longo do fluxo - barragem de Teton (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
<b>Tipo de solo</b>	Muito uniforme, areia fina sem coesão (IP < 6). <u>Solo bem graduado sem coesão (IP &lt; 6).</u>	Solo bem graduado com coesão (6 < IP < 15)	Argila plástica (IP > 15)	IP estimado igual a 3 (Tabela 13)
<b>Dispersão do material</b>	<u>Solos dispersivos,</u> <i>Pinhole</i> D1, D2	Solos potencialmente dispersivos, <i>Pinhole</i> PD1, PD2	Solos não dispersivos, <i>Pinhole</i> ND1, ND2	Formação geológica de origem eólica

<b>Compacidade</b> <sup>(a)</sup>	Fofo	Medianamente Compacto	Muito compacto	Fator desconsiderado
<b>Consistência</b> <sup>(a)</sup>	Muito Mole / Mole	Média / Rija	<u>Muito Rija / Dura</u>	IC maior do que 1

Nota (a) Empregar compacidade para solos sem coesão e consistência para solos coesivos.

Tabela 27: Fatores de influência na probabilidade de progressão do tubo - limitação do fluxo pela fundação - barragem de Teton (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
<b>Preenchimento de trinças por materiais carreados de montante (do maciço ou da fundação)</b>	Zoneamento homogêneo ou zona de montante de material coesivo. Camada de fundação sem coesão de baixa permeabilidade a montante da barragem.	<u>Camada coesiva a montante da barragem (pode fissurar).</u>	Barragem zonada com espaldar de montante de cascalho ou enrocamento. Camada de alta permeabilidade a montante da barragem.	Camada de fundação de elevada permeabilidade e material coesivo no núcleo da barragem
<b>Restrição do caminho de percolação</b>	<u>Caminho de percolação sem restrição de dimensões; ou caminho de percolação restrito, mas de grandes dimensões (por exemplo, grandes canais de dissolução de calcário).</u>	Neutro	Caminho de percolação restrito de pequena largura (por exemplo, trinças em paredes de <i>cut off</i> ou juntas estreitas em rochas).	Admitiu-se que a rocha de fundação não oferecia resistência ao fluxo de percolação
<b>Gradiente hidráulico</b>	<u>Alto.</u>	Médio.	Baixo.	Gradiente estimado de 7 e 10 no momento do incidente.

Na Figura 28 são apresentados os cálculos de probabilidade referentes à segunda fase da progressão.

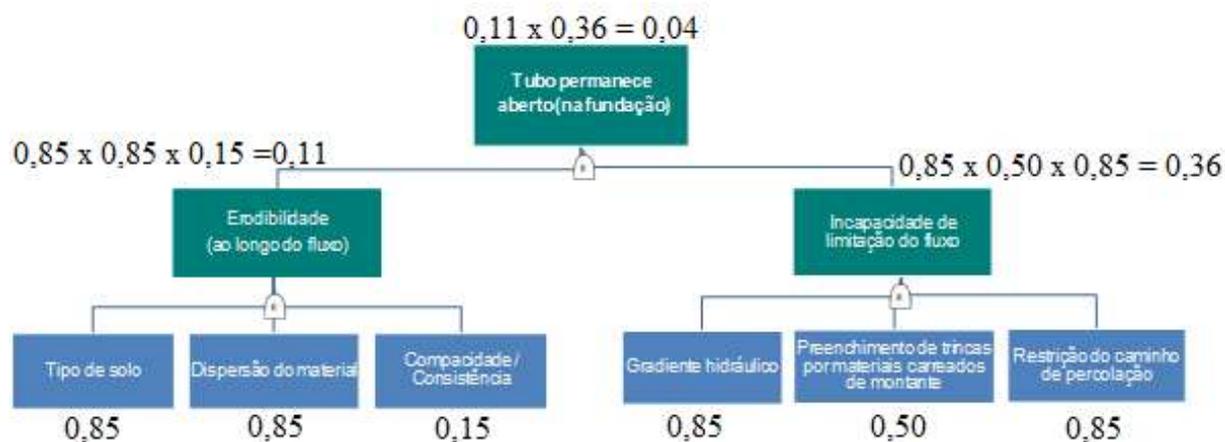


Figura 28: Cálculo da probabilidade para a permanência do tubo aberto – barragem de Teton (modificado – VALE, 2015).

- Incapacidade de detecção e intervenção

A metodologia lista quatro possíveis tipos de ambientes de controle, como descrito na Tabela 28. Os demais fatores de influência dessa etapa estão dispostos na Tabela 29. Em geral, acredita-se que as advertências a jusante tenham sido suficientes durante a emergência, embora ainda assim 14 mortes viessem a ocorrer. Assim, apesar de não haver registro de PAE, considerou-se que as equipes foram bem treinadas e que esse quadro teria tempo de resposta equivalente àquele cujas equipes não são treinadas, mas existe PAE.

Tabela 28: Fatores de influência na probabilidade de incapacidade de detecção e intervenção – barragem de Teton (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Bastante provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
<b>Efetividade do ambiente de controle</b>	Ambiente de controle informal <sup>(a)</sup>	<u>Ambiente de controle padronizado</u> <sup>(b)</sup>	Ambiente de controle monitorado <sup>(c)</sup>	Ambiente de controle otimizado <sup>(d)</sup>	Instruções dadas apenas oralmente (embora fossem seguidas), inspeções regulares e instrumentação insuficiente.

Nota (a) Ambiente de controle informal: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação sem padronização, com controle parcial das ocorrências identificadas e de planos de ação. Ausência de treinamento formal ou comunicação dos controles.

Nota (b) Ambiente de controle padronizado: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação padronizadas e com a periodicidade adequada; com controle das ocorrências identificadas e de planos de ação de forma estruturada. A instrumentação instalada pode ser parcialmente adequada para o monitoramento dos modos de falha e os tipos de controle existentes parcialmente adequados ou insuficientes.

Nota (c) Ambiente de controle monitorado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado bem estruturado. Existência de treinamento formal e comunicação dos controles. Os dados da instrumentação são analisados periodicamente e o banco de dados da instrumentação possui alertas automáticos.

Nota (d) Ambiente de controle otimizado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado que integra as informações de inspeções e auditorias internas e externas e sistema padronizado de análise de riscos, permitindo tomadas de decisão rápidas e eficientes. Equipe treinada e responsabilidades bem definidas.

Tabela 29: Fatores de influência na probabilidade de incapacidade de detecção e intervenção – barragem de Teton (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco provável	Justificativa
<b>Tempo de formação da brecha</b> <sup>(a)</sup>	Rápido (horas)	<u>Médio</u> (dias a semanas).	Lento (semanas ou meses)	Não há dados precisos para julgamento
<b>Adequação dos acessos</b>	Acesso precário, em especial nos períodos chuvosos	<u>Obra em local de difícil acesso</u>	Obra em local de fácil acesso	Não há dados precisos para julgamento
<b>Prontidão para resposta</b>	Inexistência de PAE, equipes sem treinamento	<u>Existência de PAE, equipes sem treinamento</u>	Disponibilidade e preparo da equipe de resposta	

A Figura 29 resume os cálculos realizados para a etapa de detecção, intervenção e reparação.

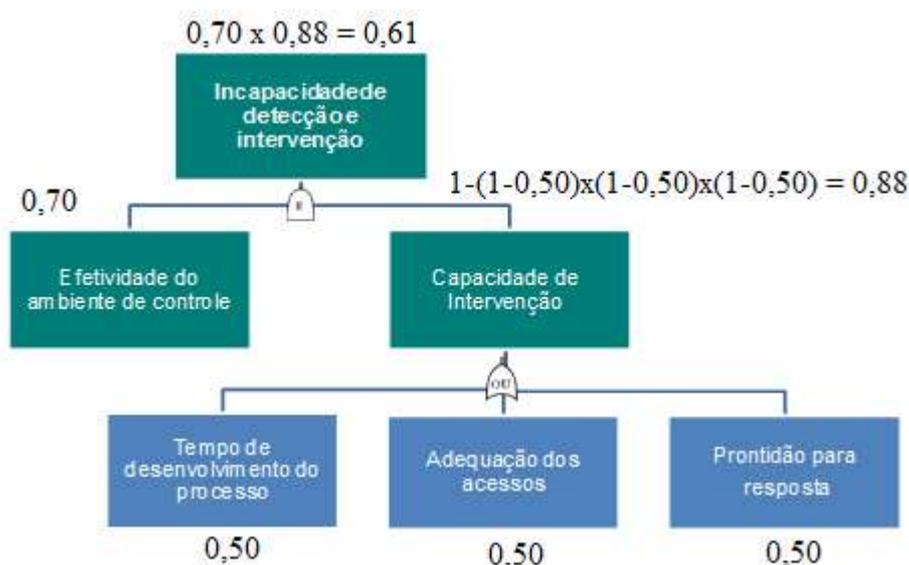


Figura 29: Cálculo da probabilidade para a incapacidade de detecção e intervenção – barragem de Teton (modificado – VALE, 2015).

- Formação do mecanismo de falha

A Tabela 30 foi utilizada para avaliar a influência dos fatores da última etapa do processo. Quanto ao volume de água armazenado, o reservatório tinha uma capacidade total de 355.242,00 m<sup>3</sup>. O Registro Mundial de Barragens, da Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB/ICOLD), considera uma grande barragem aquela que possui altura de 15 metros, ou a que possui altura entre 10 e 15 metros e uma capacidade de armazenamento de mais de três milhões de metros cúbicos em seu reservatório (Apresentação das Barragens, 2013). Por esse critério, o reservatório de Teton se mostrou consideravelmente inferior ao de grandes barragens.

Tabela 30: Fatores de influência na probabilidade de formação de brecha: alargamento do tubo - barragem de Teton (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
<b>Zoneamento do maciço</b>	Seção Homogênea	Barragem zonada, talude de jusante de areia ou pedregulho com finos	Barragem zonada com talude de jusante de pedregulho ou enrocamento	Considerou-se a zona de jusante como o próprio material do contato núcleo-fundação, dando como certo o <i>piping</i> se atingisse a rocha de fundação de jusante
<b>Volume de água armazenado</b>	Elevado	Neutro	<u>Pequeno</u>	Capacidade máxima do reservatório: 355.242 m <sup>3</sup>

A Figura 30 apresenta os valores de probabilidade referentes à formação do mecanismo de falha.

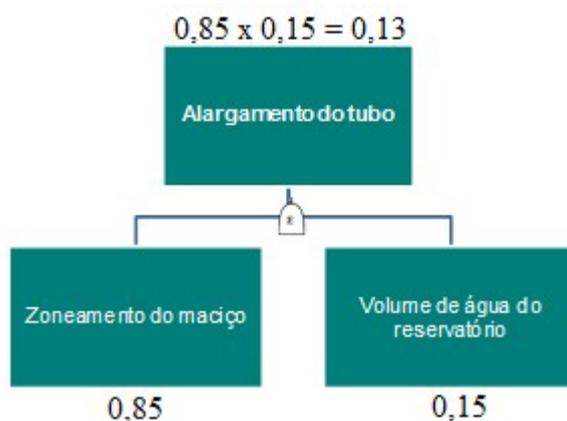


Figura 30: Cálculo da probabilidade para a formação do mecanismo de falha – barragem de Teton (modificado – VALE, 2015).

- Probabilidades finais

Um resumo das probabilidades encontradas está apresentado na Tabela 31.

Tabela 31: Resumo das probabilidades encontradas pelo método da VALE para a barragem de Teton.

Nível do reservatório	1,00
Iniciação	0,61
Continuação	1,00
Progressão (Formação do Tubo)	0,72
Progressão (Tubo permanece aberto)	0,04
Deteção e intervenção	0,61
Abertura da brecha	0,13
Probabilidade final	<b>1E-03</b>

## 6.2 BARRAGEM X

### 6.2.1 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA *PIPING TOOLBOX*

- Iniciação

Na determinação da largura máxima de fissura, optou-se por adotar um valor de 1 mm, já que não há informações suficientes para estimá-la, nem evidências detalhadas garantindo que estas não estão presentes. Portanto,  $P_{CR}$  teve o valor máximo de 1,0, como justificado no Capítulo 5 para larguras menores do que 5 mm.

A fundação da barragem conta com veios de quartzo intensamente fraturados e permeáveis atravessando a rocha de fundação (ardósia). Portanto, nessa região foram utilizados poços de alívio, funcionando como um sistema para controle do nível d'água. Em locais de maior ocorrência de veios de quartzo, previu-se o aprofundamento da trincheira, de modo a controlar a percolação da água sob a barragem. Além disso, todo o material solto e inconsistente procedente da rocha foi removido e a rocha exposta foi lavada com água e/ou jatos de ar. Por fim, a regularização e proteção da rocha limpa foram feitas com a adição de uma camada de argila compactada. Essas informações foram utilizadas no julgamento da Tabela 32 para obter  $P_{TI}$  (igual a 0,1) e, posteriormente, para calcular o valor de  $P_{path}$ , o qual foi de 0,1.

Tabela 32: Probabilidade do tratamento do *cut off* não impedir o contato do núcleo com aberturas da fundação ( $P_{TI}$ ) – Barragem X (FELL *et al.*, 2008).

Cenários	Probabilidade do tratamento não prevenir o contato
Evidência bem documentada de que não houve tratamento do <i>cut off</i>	1,0
Não há registros de construção, concepção e organização da construção não conhecidos ou conhecidos, mas provavelmente não foi dada muita atenção a inspeção de fundações e realização de tratamentos de superfície	0,3 a 0,9
Não há registros de construção, mas sabe-se que a prática do projeto e da autoridade da construção determinavam a inspeção das fundações e realização o tratamento de superfície	0,1 a 0,5
<u>Evidências de que as fundações foram mapeadas, mas não em detalhes. Algumas evidências de que as fraturas foram cobertas com concreto</u>	0,05 a 0,2
Evidências bem documentadas de que as fundações foram cuidadosamente mapeadas e todos os defeitos foram cobertos com pelo menos 100 mm de concreto de boa qualidade, ou que eles foram limpos em uma profundidade de pelo menos 3 vezes a largura da superfície e tratados com concreto dentado	0,01 a 0,1

A variável  $P_{IC}$  foi obtida com o auxílio da Tabela 34. O gradiente hidráulico adotado foi o médio dentre os valores obtidos por simulação no software SEEP/W do fluxo permanente da barragem, para a região analisada. A Figura 31 descreve as regiões dos materiais utilizados conforme PERINI (2009), e a Tabela 33 as permeabilidades exigidas na modelagem. Ressalta-se que os materiais de 3 a 5 foram substituídos pelo material 6, simplificando o modelo sem no entanto comprometer o resultado esperado, apresentado na Figura 32 e na Figura 33.

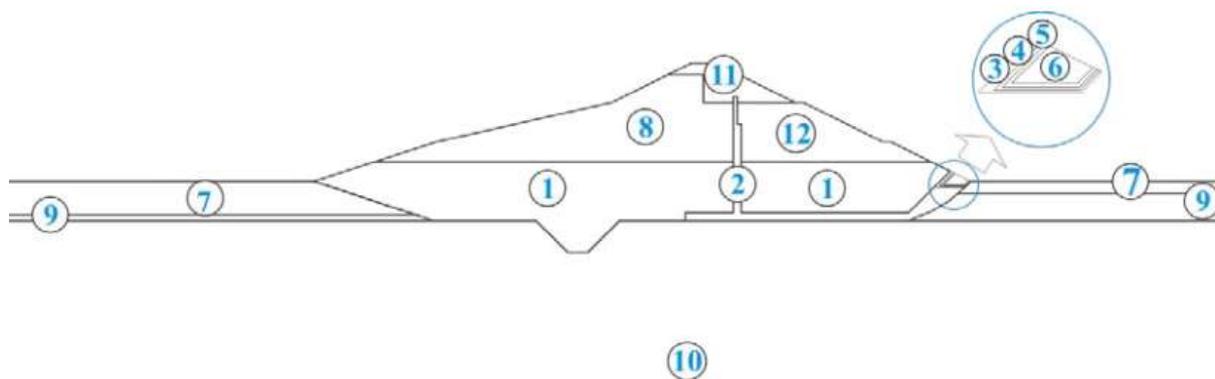


Figura 31: Distribuição das regiões e materiais adotados (PERINI, 2009).

Tabela 33: Descrição dos materiais empregados e permeabilidades adotadas (PERINI, 2009).

Material	Descrição	k (m/s)
1	Argila 1 – maciço	$3 \times 10^{-7}$
2	Areia drenos vertical e horizontal	$1 \times 10^{-4}$
6	Enrocamento do dreno de pé	$1 \times 10^{-1}$
7	Argila orgânica – fundação	$1 \times 10^{-7}$
8	Argila 2 – maciço	$3 \times 10^{-7}$
9	Ardósia alterada – fundação	$1 \times 10^{-4}$
10	Ardósia - fundação	$1 \times 10^{-10}$
11	Ardósia 3 - maciço	$4 \times 10^{-7}$
12	Argila 4 - maciço	$4 \times 10^{-7}$

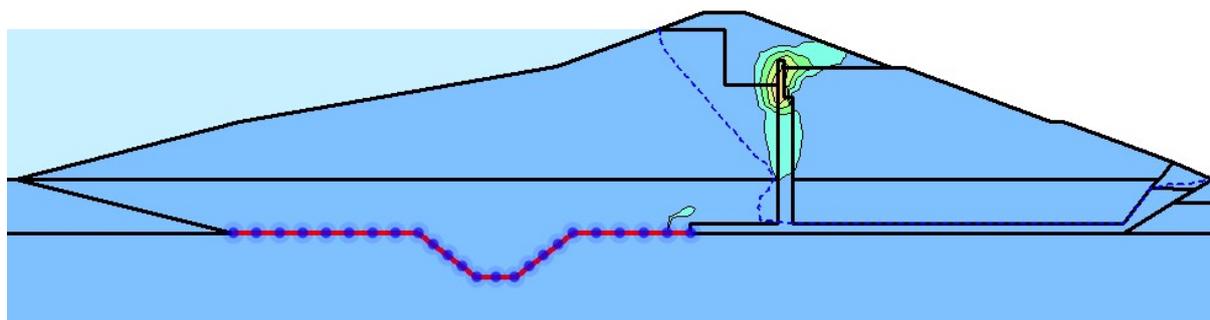


Figura 32: Simulação da Barragem X no software SEEP/W, com destaque para o local de análise do gradiente hidráulico.

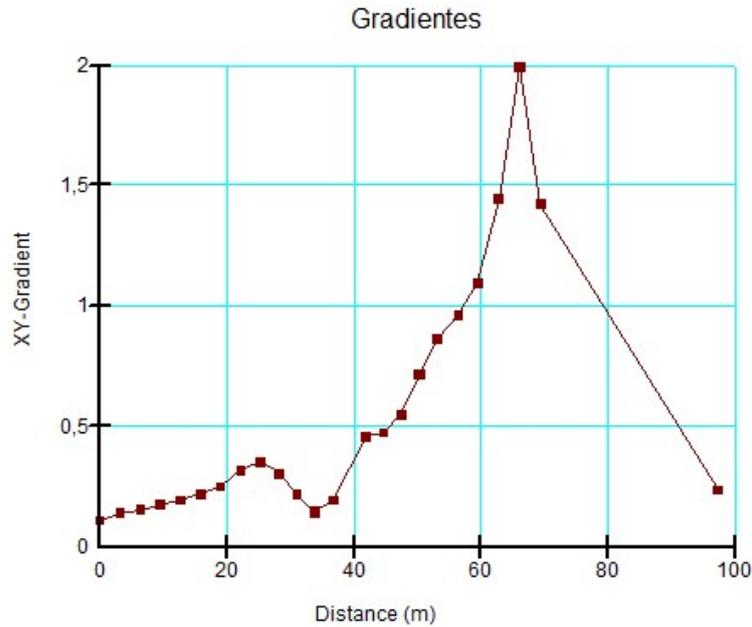


Figura 33: Gradientes hidráulicos na região indicada na Figura 32.

Tabela 34: Estimativa da probabilidade de iniciação a partir de uma fissura para solos CL-ML – Barragem X (FELL et al., 2008).

Largura estimada da fissura do núcleo para o nível de reservatório considerado (mm)	Probabilidade de iniciação para diferentes valores de gradiente ( $P_{IC}$ )					
	Gradiente hidráulico médio					
	0,1	0,25	<u>0,5</u>	1,0	2,0	5,0
1	0,02	0,1	<u>0,4</u>	0,8	0,9	0,95
2	0,1	0,5	0,7	0,9	0,95	1,0
5	0,4	0,8	0,9	0,95	1,0	1,0
10	0,7	0,9	0,95	1,0	1,0	1,0
25	0,9	0,95	1,0	1,0	1,0	1,0
50	0,95	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
75	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Observa-se que, para uma largura de fissura de 1 mm e um gradiente hidráulico médio calculado de 0,55,  $P_{IC}$  equivale a aproximadamente 0,4. Assim a probabilidade de iniciação foi igual a 0,04.

- Continuação

As curvas granulométricas para obtenção de  $D_{95}$  do solo do núcleo, representadas pela faixa de ocorrência da argila da Jazida II, estão dispostas no Anexo B. Utilizou-se uma curva intermediária como referência, em que  $D_{95}$  equivale a aproximadamente 0,4 mm. Em seguida,

tendo adotado a largura crítica de 1 mm como o tamanho da fratura aberta na fundação (JOS),  $P_{CE}$  foi obtida proporcionalmente a partir da última linha da Tabela 35, adquirindo valor equivalente a 0,25.

Tabela 35: Estimativa da probabilidade de continuação para o cenário 4 – Barragem X (FELL *et al.*, 2008).

Comparação entre JOS e o critério de continuação da erosão	
Fratura aberta na barragem	$P_{CE}$
$JOS < 0,5 \times JOS_{CE}$	0,0001
$JOS < 0,5 \times JOS_{CE}$	0,001
$JOS < 0,5 \times JOS_{CE}$	0,01
$JOS > JOS_{CE}$	0,1 – 0,9

- Progressão

De porte da Tabela 9 e da classificação unificada do solo, foi utilizada a Tabela 36 para a determinação de  $P_{PR}$ .

Tabela 36: Probabilidade de o solo suportar o teto de um tubo de *piping* ( $P_{PR}$ ) – Barragem X (FELL *et al.*, 2008).

Classificação do solo	Percentual de finos	Plasticidade de finos	Condição de umidade	Probabilidade de suportar um teto
Argilas, argilas arenosas (CL, CH, CL-CH)	> 50%	Plástico	Úmido ou saturado	<u>1,0</u>
Siltes (ML ou MH)	> 50%	Plástico ou não plástico	Úmido ou saturado	<u>1,0</u>
Areia argilosa, cascalho argiloso (SC, GC)	15% - 50%	Plástico	Úmido ou saturado	1,0
Areias siltosas, cascalhos siltosos, (SM, GM)	> 15%	Não plástico	Úmido	0,7 – 1,0
			Saturado	0,5 – 1,0
Solos granulares com alguns finos coesivos (SC-SP, SC-SW, GC-GP, GC-GW)	5% - 15%	Plástico	Úmido	0,5 – 1,0
			Saturado	0,2 – 0,5
Solos granulares com alguns finos não plásticos (SM-SP, SM-SW, GM-GP, GM-GW)	5% - 15%	Não plástico	Úmido	0,05 – 0,1
			Saturado	0,02 – 0,05
Solos granulares (SP, SW, GP, GW)	< 5%	Não plástico	Úmido e saturado	0,0001
		Plástico	Úmido e saturado	0,001 – 0,01

A probabilidade de não limitação do fluxo por um elemento a montante ( $P_{PL}$ ) também será igual a 1,0 nesse caso, como recomenda o método para casos de fundação em rocha e de *cut off* profundo. Já a probabilidade da abertura ser preenchida, mas não cessar o processo de erosão

( $P_{PC}$ ) foi obtida pela Tabela 37 e teve valor igual a 1,0. Logo, a probabilidade da etapa de progressão foi de 1,0.

Tabela 37 :Probabilidade de um preenchimento não impedir o desenvolvimento do tubo ( $P_{PC}$ ) – Barragem X (FELL *et al.*, 2008).

<b>Zoneamento do aterro</b>	<b>Zona granular a montante</b>	<b>Filtro, transição ou outro material granular a jusante</b>	<b>Probabilidade do <i>piping</i> progredir</b>
<u>Homogêneo, terra com dreno de pé, terra com dreno horizontal, terra com núcleo de argila, terra com parede central, aterro hidráulico</u>	Nenhuma, exceto pelo rip rap e filtros sob estes	Nenhum ou não efetivo	<u>1,0</u>
Terra com drenos verticais e horizontais, terra zonada	Nenhuma	Presente	1,0
Núcleo de terra central ou inclinado e enrocamento	Presente	Presente	0,1 a 0,9 – Se o núcleo é bem graduado, contendo grãos de areia de finos a grossos (0,075 – 4,75 mm) 0,01 a 0,1 – Se o núcleo é deficiente em partículas de areia e demais materiais que ajudam a vedar a zona a jusante

- Detecção, intervenção e reparação

Com as Tabelas de 37 a 39 e a Figura 34 é possível obter as probabilidades citadas na Equação 5.4. Adotou-se valor neutro para o tempo de desenvolvimento do fluxo concentrado e ruptura, utilizado na Tabela 39 e

Tabela 40, já que não há valores precisos de gradiente hidráulico ao longo do tubo. Vale ressaltar que a presente barragem é inspecionada a cada 6 meses ou um ano, portanto na Tabela 39 foi escolhida a categoria que mais se aproximava da realidade.

Tabela 38: Fatores que influenciam a probabilidade de um fluxo concentrado não ser observável ( $P_{no}$ ) – Barragem X (FELL *et al.*, 2008).

<b>Fator</b>	<b>Fator de importância relativa (RF)</b>	<b>Fator de probabilidade (LF)</b>			
		<b>Menos provável (1)</b>	<b>Neutro (2)</b>	<b>Mais provável (3)</b>	<b>Muito mais provável (4)</b>
Um fluxo concentrado pode ser observado no pé da barragem?	(3)	Fundação de baixa permeabilidade: fluxo emerge no pé e	<u>Fundação de baixa permeabilidade: fluxo emerge no pé e/ou</u>	Fundação de média permeabilidade: fluxo permanece na fundação e não emerge no pé	O nível d'água a jusante afoga parte ou todo o pé da barragem, ou fundação permeável:

		Quando não há vegetação ou há apenas uma grama rala no pé, a observação é facilitada	<u>Vegetação no pé da barragem ofusca a observação do vazamento</u>	<i>e/ou</i> Vegetação densa no pé torna difícil a observação do vazamento	fluxo não emerge no pé e Vegetação densa no pé torna difícil a observação do vazamento
Zoneamento que influencia se vazamentos emergem na face de jusante do aterro	(2)	Homogêneo, terra com parede central, terra face de concreto	<u>Terra com dreno de pé, zonada de terra, terra com núcleo de argila</u>	Terra com filtros verticais e horizontais, zonada de terra e enrocamento	Aterro com núcleo central, enrocamento com face de concreto, enrocamento com parede central
Instrumentação de fluxos de percolação	(1)	Informações de infiltrações coletadas ou monitoradas em tempo real	Informações de infiltrações parcialmente coletadas	Informações de infiltrações parcialmente coletadas, mas disfarçadas por efeitos da chuva	<u>Não há material para coletar informações de infiltrações</u>



Figura 34: Pnd versus  $\sum RF \times LF$  (FELL *et al.*, 2008).

Tabela 39: Probabilidade de não detectar a erosão interna (Pnd) dado o tempo para o desenvolvimento do fluxo concentrado – Barragem X (FELL *et al.*, 2008).

Frequência de inspeção e/ou monitoramento	Pnd					Semanas ou meses
	< 3h	3-12h	<u>12-24h</u>	1-2 dias	2-7 dias	
<u>Mensalmente, sem público próximo</u>	0,999	0,99	<u>0,95</u>	0,9	0,6	0,1
Mensalmente, com público próximo	0,999	0,8	0,5	0,25	0,1	0,05
Semanalmente, sem público próximo	0,99	0,95	0,9	0,7	0,2	0,1
Semanalmente, com público próximo	0,99	0,75	0,5	0,2	0,1	0,05
Diariamente, sem público próximo	0,9	0,6	0,5	0,1	0,05	0,01
Diariamente, com público próximo	0,8	0,5	0,4	0,1	0,05	0,01
Diariamente, com monitoramento em tempo real	0,2	0,15	0,1	0,1	0,05	0,01

Tabela 40: Probabilidade de que, dado que o fluxo concentrado é detectado, a intervenção e o reparo não são bem-sucedidos (Pui) – Barragem X (FELL *et al.*, 2008).

<b>Tempo para desenvolvimento do fluxo concentrado e ruptura</b>	<b>O que pode ser feito</b>	<b>Pui</b>
< 3h	O tempo é muito curto para intervir de forma eficiente, independentemente do modo de falha	0,99
3-12h	Na maioria dos casos, será impraticável intervir com sucesso nesse período de tempo. Apenas nos casos em que houver um método direto de intervenção, além de pessoal, equipamento e material disponível, a intervenção será bem-sucedida.	0,9-0,99
<u>12-24h</u>	Em muitos casos, será impraticável intervir com sucesso nesse período de tempo. A intervenção será bem-sucedida somente nos casos em que houver um método direto de intervenção, além de pessoal, equipamento e material disponível; ou quando se tratar de um pequeno reservatório que pode ter seu nível rebaixado	<u>0,85-0,99</u>
1-2 dias	Em muitos casos, será impraticável intervir com sucesso nesse período de tempo. A intervenção será bem-sucedida somente nos casos em que houver um método direto de intervenção, além de pessoal, equipamento e material disponível; ou quando se tratar de um reservatório pequeno ou médio com uma comporta de elevada capacidade de descarga, que poderá proporcionar o rebaixamento do nível do reservatório	0,7-0,95
2-7 dias	Em alguns casos, será possível intervir com sucesso nesse período de tempo. Nos casos em que houver um método direto de intervenção, além de pessoal, equipamento e material disponível; ou quando se tratar de um reservatório pequeno ou médio com uma comporta de elevada capacidade de descarga, permitindo o rebaixamento do nível do reservatório	0,2-0,9 <sup>(a)</sup>
Semanas ou meses	Em alguns casos, será possível intervir com sucesso nesse período de tempo. A intervenção tem grandes chances de ser sucedida quando houver um método direto de intervenção, além de pessoal, equipamento, material disponível e muitos recursos; ou quando se tratar de um reservatório pequeno ou médio com uma comporta de elevada capacidade de descarga, permitindo o rebaixamento do nível do reservatório	0,1-0,8 <sup>(a)</sup>

Notas: (a) Usar valores menores do que 0,5 somente se houver um alto grau de confiança no valor estimado.

Assim, os valores adotados foram de 0,27 para P<sub>noI</sub>, 0,95 para P<sub>nd</sub> e 0,85 para P<sub>ui</sub>, chegando a uma probabilidade de 0,99 para o nó de detecção, intervenção e reparação.

- Abertura da brecha

Da mesma forma que na barragem de Teton, a análise foi feita apenas para o mecanismo final de falha de alargamento do tubo. Assim, a Tabela 41 foi utilizada para obtenção de P<sub>ge</sub>, cujo valor foi de 0,6.

Tabela 41: Probabilidade de abertura da brecha pelo alargamento do tubo (Pge) – Barragem X (FELL *et al.*, 2008).

Classificação do solo	Melhor índice estimado de taxa de erosão (IHET)	Tempo para o nível do reservatório cair abaixo do nível do tubo	Pge
SM, SC, <u>ML</u> , solos dispersivos	$\leq 3$	-	1,0
	2 - 3		
<u>CL</u> , CL-CH, MH ou CH com Limite de Liquidez <65%	4	> 2 dias	0.8 - 0.95
	3 - 5	1 - 2 dias	<u>0.6</u> - 0.8
		<1 dia	0.3 - 0.6
CH com Limite de Liquidez > 65%	5	> 2 semanas	0.8 - 0.95
	4 - 6	1 - 2 semanas	0.3 - 0.8
		< 1 semana	0.1 - 0.3
CH com Limite de Liquidez <65% ou CH com Limite de Liquidez >65%	6	Suscetível a se auto limitar	0,05 - 0,1

- Probabilidades finais

Um resumo das probabilidades encontradas está apresentado na Tabela 42.

Tabela 42: Resumo das probabilidades encontradas pelo método do *Piping Toolbox* para a Barragem X.

Iniciação	P <sub>CR</sub>	1,0
	P <sub>TI</sub>	0,1
	P <sub>IC</sub>	0,4
	P <sub>path</sub>	0,1
	<b>P<sub>I</sub></b>	<b>0,04</b>
Continuação	<b>P<sub>CE</sub></b>	<b>0,25</b>
Progressão	P <sub>PR</sub>	1,0
	P <sub>PL</sub>	1,0
	P <sub>PC</sub>	1,0
	<b>P<sub>P</sub></b>	<b>1,0</b>
Detecção e intervenção	P <sub>noI</sub>	0,27
	P <sub>nd</sub>	0,95
	P <sub>ui</sub>	0,85
	<b>P<sub>no</sub></b>	<b>0,99</b>
Abertura da brecha	<b>P<sub>br</sub></b>	<b>0,6</b>
Probabilidade final	<b>P<sub>f</sub></b>	<b>6E-03</b>

## 6.2.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA VALE

- Nível do reservatório

O nível operacional da barragem, dado pela cota da crista do vertedouro, é de 1072 m. Esse nível é 1 m abaixo do nível máximo maximum de 1073 m e 12 m acima do mínimo de 1060 m. Logo, o nível d'água de 12 m representa uma porcentagem de 92,31% do total, valor adotado para a probabilidade deste nó.

- Iniciação

A Tabela 43 foi utilizada para avaliar a influência do gradiente hidráulico e a Tabela 44 para avaliar as características de erodibilidade do material.

Tabela 43: Fatores de influência na probabilidade de iniciação de erosão interna: gradiente hidráulico - Barragem X (VALE, 2015).

Fator de influência	Virtualmente certo	Mais provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
<b>Gradiente Hidráulico</b>	Presença de surgência de água	Alto	<u>Médio</u>	Baixo	Gradiente hidráulico médio calculado de 0,55

Tabela 44: Fatores de influência na probabilidade de iniciação de erosão interna: erodibilidade do maciço para a fundação - Barragem X (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco provável	Justificativa
<b>Características da fundação</b>	Presença de juntas abertas ou solos de granulometria grosseira em contato com o núcleo.	<u>Neutro</u>	Inexistência de juntas abertas ou solos de granulometria graúda na fundação em contato com o núcleo.	Veios de quartzo intensamente fraturados na rocha de fundação, mas sem continuidade transversal à barragem. Argila compactada na base da trincheira
<b>Granulometria</b>	Falta de compatibilidade da granulometria do maciço com as aberturas existentes na fundação.	<u>Neutro</u>	Compatibilidade da granulometria do maciço com as aberturas existentes na fundação.	Não há informações suficientes, como ensaios de dispersibilidade.
<b>Tratamento de fundação</b>	Fundação sem tratamento no contato com o núcleo.	Neutro	<u>Fundação tratada com concreto dental ou filtro entre o núcleo e a fundação.</u>	Poços de alívio para controle do fluxo de água

Os resultados da etapa da iniciação estão representados na Figura 35, através de sua árvore de eventos com os valores de probabilidade de cada ramo calculado.

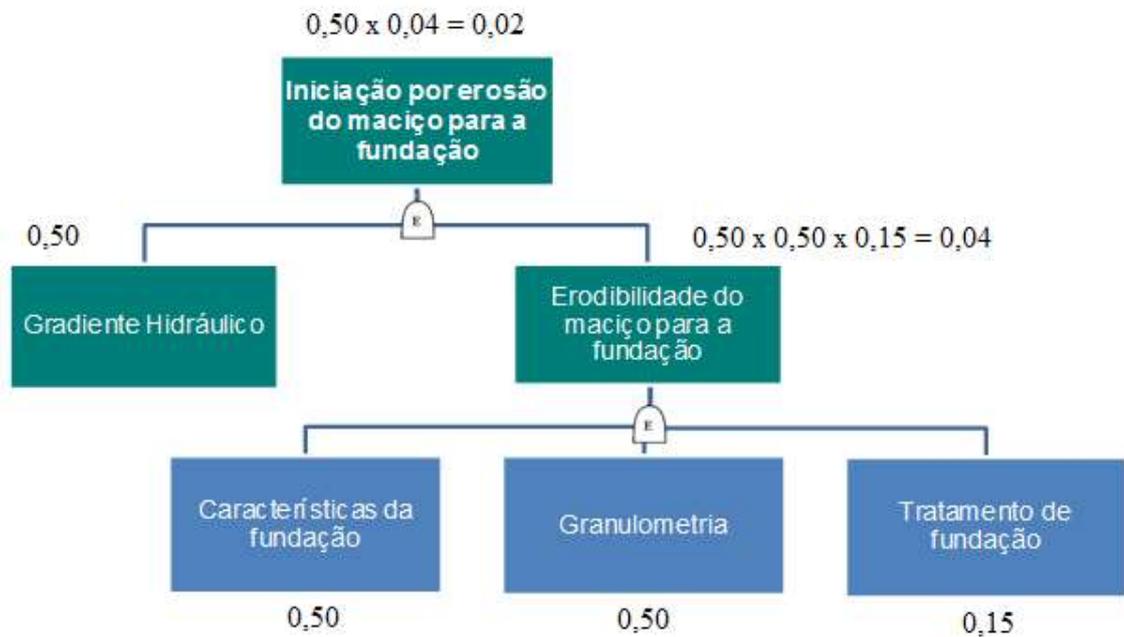


Figura 35: Cálculo da probabilidade de iniciação por erosão do maciço para a fundação – Barragem X (modificado – VALE, 2015).

- Continuação

A influência do filtro na etapa de continuação foi tida como indiferente, não sendo um critério aplicável. Assim a probabilidade atribuída a esse nó foi igual a 1,0.

- Progressão (formação do tubo)

As características da primeira etapa de progressão estão representadas na Tabela 45 e na Figura 36 são apresentados os cálculos de probabilidade.

Tabela 45: Fatores de influência na probabilidade de formação de tubo: habilidade de suportar um teto – Barragem X (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
Teor de finos (% menor que 0,075mm)	Teor de finos $\geq 15\%$	Teor de finos $< 15\%$ e $> 5\%$	Sem finos ou teor de finos $< 5\%$	Percentual de argila de 44% (Tabela 9)

<b>Grau de saturação</b>	Parcialmente saturado (primeiro enchimento)	-	<u>Saturado</u>	Região abaixo da linha freática, considerando que o reservatório foi enchido a anos
--------------------------	--	---	-----------------	---

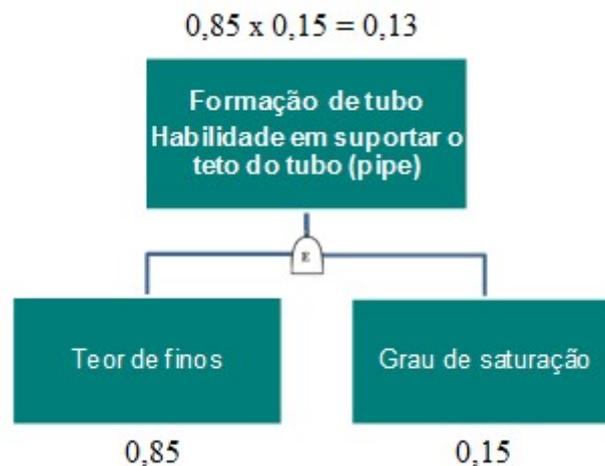


Figura 36: Cálculo da probabilidade de formação de tubo – Barragem X (modificado – VALE, 2015).

- Progressão (o tubo permanece aberto)

Primeiramente, analisou-se as condições de erodibilidade do material ao longo do fluxo através da Tabela 46 e, em seguida, a incapacidade de limitação do fluxo pela Tabela 47.

Tabela 46: Fatores de influência na probabilidade de progressão do tubo: erodibilidade da fundação ao longo do fluxo - Barragem X (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
<b>Tipo de solo</b>	Muito uniforme, areia fina sem coesão (IP < 6). Solo bem graduado sem coesão (IP < 6).	Solo bem graduado com coesão (6 < IP < 15)	<u>Argila plástica (IP &gt; 15)</u>	IP igual a 16,7 (Tabela 9)
<b>Dispersão do material</b>	Solos dispersivos, <i>Pinhole</i> D1, D2	<u>Solos potencialmente dispersivos, Pinhole PD1, PD2</u>	Solos não dispersivos, <i>Pinhole</i> ND1, ND2	Não há dados de ensaios de dispersão
<b>Compacidade</b> <sup>(a)</sup>	Fofo	Medianamente Compacto	Muito compacto	Fator desconsiderado por se tratar de uma argila
<b>Consistência</b> <sup>(a)</sup>	Muito Mole / Mole	Média / Rija	<u>Muito Rija / Dura</u>	IC maior do que 1

Nota (a) Empregar compacidade para solos sem coesão e consistência para solos coesivos.

Tabela 47: Fatores de influência na probabilidade de progressão do tubo: limitação do fluxo pela fundação - Barragem X (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
<b>Preenchimento de trinças por materiais carreados de montante (do maciço ou da fundação)</b>	Zoneamento homogêneo ou zona de montante de material coesivo. Camada de fundação sem coesão de baixa permeabilidade a montante da barragem.	<u>Camada coesiva a montante da barragem (pode fissurar).</u>	Barragem zonada com espaldar de montante de cascalho ou enrocamento. Camada de alta permeabilidade a montante da barragem.	Camada coesiva a montante da barragem
<b>Restrição do caminho de percolação</b>	Caminho de percolação sem restrição de dimensões; ou caminho de percolação restrito, mas de grandes dimensões (por exemplo, grandes canais de dissolução de calcário).	<u>Neutro</u>	Caminho de percolação restrito de pequena largura (por exemplo, trinças em paredes de <i>cut off</i> ou juntas estreitas em rochas).	Não há dados precisos para julgamento
<b>Gradiente hidráulico</b>	Alto.	<u>Médio.</u>	Baixo.	Gradiente hidráulico médio calculado de 0,55

Na Figura 37 são apresentados os cálculos de probabilidade referentes à segunda fase da progressão.

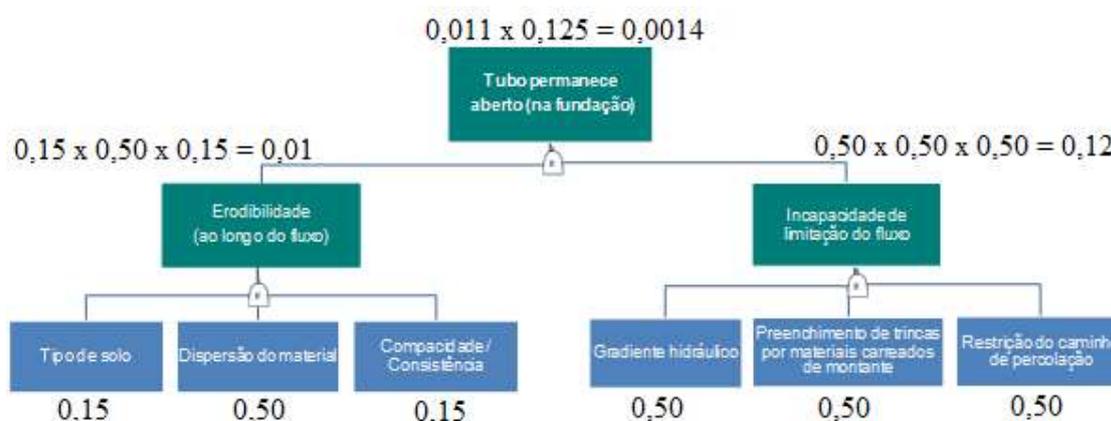


Figura 37: Cálculo da probabilidade para a permanência do tubo aberto – Barragem X (modificado – VALE, 2015).

- Incapacidade de detecção e intervenção

Os tipos de ambientes de controle estão descritos na Tabela 48 e os demais fatores de influência na Tabela 49.

Tabela 48: Fatores de influência na probabilidade de incapacidade de detecção e intervenção – Barragem X (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Bastante provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
<b>Efetividade do ambiente de controle</b>	Ambiente de controle informal <sup>(a)</sup>	<u>Ambiente de controle padronizado</u> <sup>(b)</sup>	Ambiente de controle monitorado <sup>(c)</sup>	Ambiente de controle otimizado <sup>(d)</sup>	As inspeções são visuais, de forma periódica.

Nota (a) Ambiente de controle informal: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação sem padronização, com controle parcial das ocorrências identificadas e de planos de ação. Ausência de treinamento formal ou comunicação dos controles.

Nota (b) Ambiente de controle padronizado: Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação padronizadas e com a periodicidade adequada; com controle das ocorrências identificadas e de planos de ação de forma estruturada. A instrumentação instalada pode ser parcialmente adequada para o monitoramento dos modos de falha e os tipos de controle existentes parcialmente adequados ou insuficientes.

Nota (c) Ambiente de controle monitorado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado bem estruturado. Existência de treinamento formal e comunicação dos controles. Os dados da instrumentação são analisados periodicamente e o banco de dados da instrumentação possui alertas automáticos.

Nota (d) Ambiente de controle otimizado: Controles existentes adequados e suficientes e suportados por sistema informatizado que integra as informações de inspeções e auditorias internas e externas e sistema padronizado de análise de riscos, permitindo tomadas de decisão rápidas e eficientes. Equipe treinada e responsabilidades bem definidas.

Tabela 49: Fatores de influência na probabilidade de incapacidade de detecção e intervenção – Barragem X (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco provável	Justificativa
<b>Tempo de formação da brecha</b> <sup>(a)</sup>	Rápido (horas)	<u>Médio (dias a semanas).</u>	Lento (semanas ou meses)	Não há dados precisos para julgamento
<b>Adequação dos acessos</b>	Acesso precário, em especial nos períodos chuvosos	Obra em local de difícil acesso	<u>Obra em local de fácil acesso</u>	O acesso até a barragem é fácil, sendo constituído por vias pavimentadas e um pequeno trecho em estrada de terra
<b>Prontidão para resposta</b>	<u>Inexistência de PAE, equipes sem treinamento</u>	Existência de PAE, equipes sem treinamento	Disponibilidade e preparo da equipe de resposta	A barragem não contém PAE

A Figura 38 resume os cálculos realizados nessa etapa.

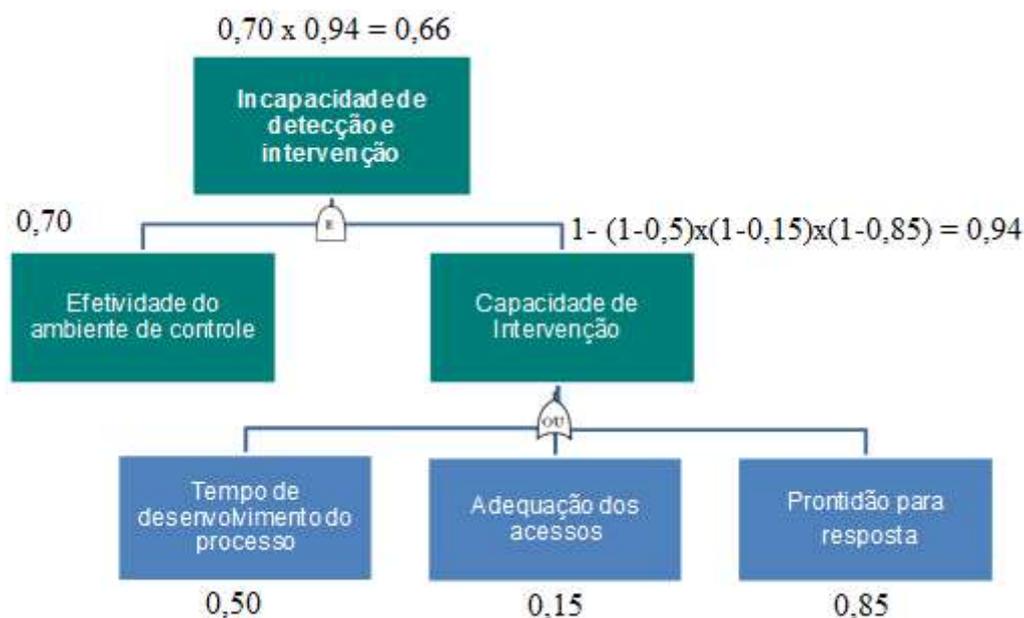


Figura 38: Cálculo da probabilidade para a incapacidade de detecção e intervenção – Barragem X (modificado – VALE, 2015).

- Formação do mecanismo de falha

A Tabela 50 foi utilizada para avaliar a influência dos fatores da última etapa do processo e a Figura 39 apresenta os seus valores de probabilidade.

Tabela 50: Fatores de influência na probabilidade de formação de brecha: alargamento do tubo - Barragem X (VALE, 2015).

Fator de influência	Mais provável	Neutro	Pouco Provável	Justificativa
<b>Zoneamento do maciço</b>	<u>Seção Homogênea</u>	Barragem zonada, talude de jusante de areia ou pedregulho com finos	Barragem zonada com talude de jusante de pedregulho ou enrocamento	Barragem homogênea
	Barragem zonada com zona de jusante capaz de suportar o teto do tubo			
<b>Volume de água armazenado</b>	Elevado	<u>Neutro</u>	Pequeno	Volume de 1,1 milhão de metros cúbicos, aproximadamente metade do limite inferior para grandes reservatórios, segundo Apresentação das Barragens (2013)

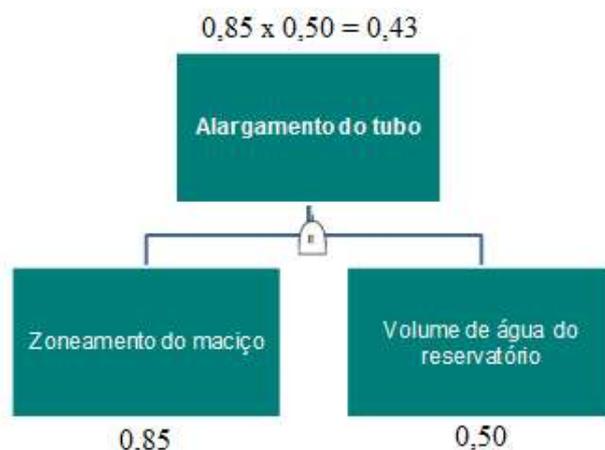


Figura 39: Cálculo da probabilidade para a formação do mecanismo de falha – Barragem X (modificado – VALE, 2015).

- Probabilidades finais

Um resumo das probabilidades encontradas está apresentado na Tabela 51.

Tabela 51: Resumo das probabilidades encontradas pelo método da VALE para a Barragem X.

Nível do reservatório	1,00
Iniciação	0,02
Continuação	1,00
Progressão (Formação do tubo)	0,13
Progressão (Tubo permanece aberto)	0,0014
Detecção, intervenção e reparação	0,66
Abertura da brecha	0,43
Probabilidade final	<b>9E-07</b>

### 6.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Primeiramente, o método da VALE conta com um nó para o nível do reservatório, o qual não está presente no método *Piping Toolbox*. Neste, na etapa de iniciação, as fissuras são analisadas de forma quantitativa, diferentemente do método da VALE em que a análise é qualitativa. Além disso, o tratamento da fundação nesse método apresenta mais de uma categoria intermediária entre uma fundação tratada e uma não tratada, sendo considerados aspectos como existência de registros de construção e qualidade do tratamento. Ademais, a probabilidade desse nó será tanto maior quanto menor forem a granulação e a compressibilidade do solo, a depender da sua classificação unificada. Por outro lado, no método da VALE não são apresentados critérios para auxiliar no julgamento da compatibilidade entre granulometria do maciço e aberturas na

fundação. Por fim, a respeito do gradiente hidráulico, no *Piping Toolbox* se orienta utilizar um valor médio, enquanto no método da VALE não é especificado se o gradiente hidráulico deve ser máximo, médio ou local. Julga-se que o ideal seria considerar um gradiente máximo, uma vez que a água tende a percorrer caminhos críticos.

Na etapa de continuação do método *Piping Toolbox*, o critério válido para *piping* do maciço para a fundação é baseado na máxima largura de fissura da fundação, enquanto o critério do método da VALE diz respeito à eficiência do filtro, o que seria mais adequado para análises de *piping* no maciço.

Na etapa de progressão do método da VALE, no quesito de erodibilidade do material, são considerados fatores como tipo de solo, dispersão e consistência; enquanto, no método *Piping Toolbox*, o critério que mais se aproxima a este considera a influência de um preenchimento no desenvolvimento do tubo, através de uma análise do zoneamento e da uniformidade do material. Quanto à limitação do fluxo por um elemento a montante, o método da VALE considera, além de características da zona de montante (como realizado no *Piping Toolbox*), restrições no caminho de percolação e o valor de gradiente hidráulico. Em ambos os métodos, na estimativa da habilidade de suportar um tubo, considera-se o teor de finos e o grau de saturação. Contudo, no método *Piping Toolbox*, os solos mais finos não apresentam diferenciação no valor da probabilidade para diferentes condições de umidade.

Os resultados desse nó chamaram atenção, pois, nas duas barragens, a diferença encontrada entre os métodos foi significativa, apesar de em ambos terem sido calculadas probabilidades que prometiam levar em conta os mesmos fatores: a capacidade do tubo se manter aberto, a habilidade de suportar um teto de tubo e a limitação do fluxo pela fundação, como apresentado na Tabela 52. Além disso, o método da VALE tende a gerar menores valores de probabilidade nesse nó pelo fato de haver mais fatores, sendo realizadas mais operações de multiplicação.

Tabela 52: Resultados do nó da progressão.

	<i>Piping Toolbox</i>		VALE	
	Teton	Barragem X	Teton	Barragem X
Habilidade de suportar um teto de tubo	1	1	0,72	0,13
Capacidade do tubo se manter aberto	0,5	1	0,04	0,0014
Limitação do fluxo pela fundação	1	1		
Total	0,5	1	0,03	0,00018

Na etapa de detecção e intervenção, dos elementos que interferem na visualização de surgências do método do *Piping Toolbox* (presença de água ou vegetação no pé da barragem, zoneamento e instrumentação de fluxos de percolação), apenas o último é considerado na efetividade do ambiente de controle do método da VALE, o qual também considera a existência de padronização e automatização da instrumentação. Por outro lado, entre as ferramentas para uma intervenção bem-sucedida no *Piping Toolbox* estão a existência de pessoal, equipamento e material disponível. Contudo, não são considerados o treinamento dessas equipes e a existência de PAE, como no item de prontidão de resposta do método da VALE. Já os tempos para desenvolvimento da brecha são calculados em ambos os métodos pela mesma metodologia, esta dependente de um dado de difícil obtenção que é o gradiente hidráulico ao longo do tubo de *piping*. Quanto à facilidade de acessar o local da obra, o método do *Piping Toolbox* não traz referência como no método da VALE.

Na etapa de abertura da brecha, o método da VALE considera, no item de zoneamento do maciço, que quanto mais fina for a zona de jusante mais provável se torna a formação da brecha. Já no método *Piping Toolbox*, além dessa consideração, refletida na classificação unificada do solo, se leva em conta sua dispersividade por meio do índice de taxa de erosão. Por outro lado, enquanto a influência da água é considerada no método do *Piping Toolbox* pelo tempo para que o nível do reservatório caia abaixo do nível do tubo, no método da VALE considera-se o volume de água do reservatório, um critério de informação mais acessível. Além disso, o método do *Piping Toolbox* permite estimar as probabilidades para os quatro mecanismos de abertura da brecha, enquanto o da VALE estima apenas para o alargamento do tubo.

A Tabela 53 apresenta o resumo da comparação entre os métodos.

Tabela 53: Comparação entre os critérios adotados em cada método.

<b>Etapa</b>	<b><i>Piping Toolbox</i></b>	<b>VALE</b>
Iniciação	Presença de fissuras (quantitativamente)	Presença de fissuras (qualitativamente)
	Tratamento da fundação	Tratamento da fundação
	Classificação unificada do solo	Compatibilidade entre granulometria do maciço e aberturas da fundação
	Gradiente hidráulico médio	Gradiente hidráulico
Continuação	Máxima largura de fissura na fundação	-
	-	Eficiência do filtro

Progressão	Preenchimento capaz de restringir o desenvolvimento do tubo	Erodibilidade do material
	Limitação do fluxo por um elemento a montante	Limitação do fluxo pela fundação
	Habilidade de suportar um teto de tubo	Habilidade de suportar um teto de tubo
Detecção e intervenção	Elementos que interferem na visualização de surgências	Efetividade do ambiente de controle
	Frequência de inspeção e/ou monitoramento	
	-	Adequação dos acessos
	Ferramentas para uma intervenção bem-sucedida	Prontidão para resposta
	Tempo para desenvolvimento do fluxo concentrado e ruptura	Tempo de desenvolvimento da brecha
Abertura da brecha	Classificação unificada do solo	Zoneamento do maciço (granulação do material)
	Taxa de erosão do solo	
	Tempo para o nível do reservatório cair abaixo do nível do tubo	Volume de água do reservatório

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou assuntos relacionados à ruptura por *piping* em barragens de aterro compactado. A análise foi aprofundada para casos de *piping* na região do maciço para a fundação, sendo calculadas as probabilidades de ruptura de duas barragens por esse modo de falha, o que foi feito com o uso de árvores de falhas e de eventos sugeridas pelas metodologias.

Com as metodologias do *Piping Toolbox* e da VALE, respectivamente, foram encontradas probabilidades de 2E-01 e 6E-03 para a barragem de Teton e de 1E-03 e 9E-07 para a Barragem X. Esses dados mostram que apenas o resultado obtido para a Barragem X pelo método da VALE estaria de acordo com o limite aceitável para a probabilidade anual de falhas de 1E-04, estipulado pelo Bureau de Reclamação dos Estados Unidos (USBR). A diferença de aproximadamente 1E04 entre resultados encontrados pelos dois métodos para a Barragem X foi equivalente ao encontrado por Drumond (2018), que também realizou uma análise comparativa entre os métodos em barragem homogênea, mas para *piping* no maciço. Ademais, os elevados valores de probabilidade encontrados para a barragem de Teton já eram esperados, uma vez que a barragem rompeu por *piping*. Por conseguinte, essas discrepâncias de resultados de 100 vezes no caso da barragem de Teton e de 10.000 vezes no caso da Barragem X demonstram a necessidade de entender qual método mais se aproxima da realidade.

Quanto às probabilidades atribuídas aos fatores de influência do processo de *piping*, observou-se que diversas tabelas da metodologia *Piping Toolbox* apresentam uma faixa de valores possíveis, tornando esse método mais dependente da experiência e do bom senso do usuário. Por outro lado, o método não restringe a classificação a probabilidades fixas, podendo ser atribuídos valores de um a quase zero. Já a metodologia da VALE apresenta apenas um valor de probabilidade por item, sendo este necessariamente igual a uma das seis probabilidades equivalentes pré-determinadas. Ademais, em muitos dos nós as categorias “Virtualmente impossível”, “Bastante provável” e “Virtualmente certo” não são sugeridas, limitando a classificação do item não a seis, mas a três probabilidades equivalentes, referentes às chances de ocorrência “Pouco provável”, “Neutro” ou “Mais provável”.

Contudo, por mais que pareça ideal atribuir probabilidades personalizadas para cada fator de influência em um universo contínuo de valores, como propõe o *Piping Toolbox*, não é possível saber o grau de precisão desse feito, ou seja, se esses valores realmente condizem com a realidade. Afinal, entende-se que a complexidade das estruturas analisadas torna difícil essa determinação.

Outro ponto a ser abordado é a funcionalidade dos métodos, que pode ser refletida na acessibilidade dos dados exigidos e na simplicidade da metodologia. Apenas dois dados foram considerados difíceis de serem obtidos, os quais estão relacionados a condições de tempo. São eles: o tempo para que o nível do reservatório caia abaixo do nível do tubo, na etapa de abertura da brecha do *Piping Toolbox*, e o tempo para desenvolvimento da brecha, na etapa de detecção e intervenção de ambos os métodos. Além disso, o único dado obtido via software foi o gradiente hidráulico, mas caso houvesse piezômetros instalados nas barragens esse recurso seria dispensável. Logo, se houver um projeto bem detalhado e dados de instrumentação e de ensaios geotécnicos as metodologias certamente serão viáveis.

Ressalta-se que, no caso da barragem de Teton, algumas escolhas feitas na classificação dos fatores de influência só foram possíveis por se tratar de uma retroanálise, em que se dispõe de dados de investigações pós-ruptura. Desta forma, dificilmente teria sido obtido o mesmo resultado em uma avaliação feita antes do rompimento da barragem. Algumas dessas escolhas são o nível do reservatório e o mecanismo de abertura da brecha considerados.

De modo geral, em ambos os métodos são claros os procedimentos para estimativa da probabilidade de cada nó, sendo apresentados inclusive em uma parte contínua do documento, com exceção da etapa de iniciação do *Piping Toolbox*. Esta, por outro lado, se mostra extensa, segmentada e de difícil entendimento, devido sobretudo a dois fatores. O primeiro se deve à possibilidade de analisar mais de um mecanismo de iniciação, os quais são equacionados de forma diferente. Já o segundo se deve à complexidade da estimativa da máxima largura de fissura, por esta poder ser originada a partir de diversos processos geológicos. No caso da barragem de Teton, a problemática do segundo fator foi contornada com a utilização de um valor de fissura obtido por investigação de campo.

É importante destacar que, apesar dessa clareza das demais etapas, ambos os métodos apresentam pontos de melhoria. Verificou-se que assim como o *Piping Toolbox* traz considerações não presentes no método da VALE, também este leva em conta critérios ausentes no primeiro. Portanto, em trabalhos futuros poderia ser sugerida uma metodologia que reunisse os pontos positivos apontados em cada método. As metodologias poderiam também ser aplicadas em barragens de rejeitos, podendo ser feita uma análise que considere todos os mecanismos de iniciação e de abertura da brecha. Por fim, essas metodologias poderiam ser associadas a outras que proponham estimar os danos da ruptura, para que a análise de risco seja completa.

## REFERÊNCIAS

- APRESENTAÇÃO das Barragens. **CBDB**, 2013. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20das%20Barragens>>. Acesso em: 07 jun. 2019.
- BALBI, D. A. F. **Curso Segurança de Barragens**. Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011. Brasil: ICBA. 2005.
- BANDO, F. M. et al. **Análise probabilística de árvore de falhas na gestão de segurança de barragens - Bloco D38 da Barragem de Itaipu**. XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu: [s.n.]. 2015.
- BELO Horizonte Antiga. **UOL Fotoblog**, 2007. Disponível em: <<http://belo-horizonte.fotoblog.uol.com.br/photo20070507121957.html>>. Acesso em: 10 out. 2018.
- BRAZ, M. D. G. **A relação do fenômeno de ruptura hidráulica em maciços de barragens de terra e o mau funcionamento de vertedores do tipo poço**. UFMG. Belo Horizonte. 2003.
- CALDEIRA, L. M. M. S. **Análises de Risco em Geotecnia - Aplicação a barragens de aterro**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa. 2008.
- DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Principles of Geotechnical Engineering**. 8. ed. Stamford, EUA: CENGAGE Learning, 2014.
- DRUMOND, G. R. **Cálculo da probabilidade de ruptura por erosão interna de barragem de terra por dois métodos distintos**. CEFET-MG. Belo Horizonte. 2018.
- DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. **Slope Strength and Slope Stability**. 2. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2014.
- EIKENBERRY, F. et al. **Failure of Teton Dam: Final Report**. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, v. Stock N° 024-033-00136-8, 1980.
- FELL, R. et al. **Risk Analysis for Dam Safety - A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping Guidance Document**. University of New South Wales. Sydney, Austrália, p. 337. 2008. (UNICIV REPORT N° R-446).
- FELL, R. et al. **Geotechnical Engineering of Dams**. 2. ed. Londres: CRC Press, 2015.
- FEMA. **Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion**. Interagency Committee on Dam Safety (ICODS), Federal Emergency Management Agency (FEMA). [S.l.]. 2015.

FOSTER, M. et al. The statistics of embankment dam failures and accidents. **NRC**, Canadá, 2000.

FOSTER, M. et al. **Seepage and Piping Toolbox - Continuation, Progression, Intervention and Breach**. The Sustainability of Experience Investing in the Human Factor. Portland: USSD. 2008.

GEOTÉCNICA. **Relatório Final da Barragem do Santa Maria**. GB-210-N4/69. Rio de Janeiro. 1971.

HARTFORD, D. N. D.; BAECHER, G. B. **Risk and uncertainty in dam safety**. CEA Technologies Dam Safety Interest Group. Londres. 2004.

ICOLD. **Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations, vol. 1**. Boletim 164, International Commission On Large Dams (ICOLD). [S.l.]. 2017.

INDEPENDENT PANEL. **Failure of Teton Dam**. U.S Department of the Interior and State of Idaho. Washington D.C. 1976.

JOHNSON, F.; ILLES, P. **A Classification of Dam Failures**. [S.l.]: Water Power Dam Constr, v. 28(12), 1976.

JÓNATAS, J. L. **Rotura de barragens de aterro por galgamento - Ensaios experimentais com aterros homogêneos**. Dissertação (mestrado). Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Universidade de Lisboa. Lisboa. 2013.

LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de Segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: O Caso UHE - São Simão**. UFMG. Belo Horizonte. 2007.

MUSEU Virtual Pampulha. **Museu Virtual Brasil**, 2012. Disponível em: <[http://www.museuvirtualbrasil.com.br/museu\\_pampulha/](http://www.museuvirtualbrasil.com.br/museu_pampulha/)>. Acesso em: 18 out. 2018.

NETO, L. V. **Estudo de ruptura da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: Retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais**. UFMG. Belo Horizonte. 2016.

PERINI, D. S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragem de terra**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G.DM-180/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF, p. 128p. 2009.

PRINCIPAIS Benefícios das Barragens. **CBDB**, 2013. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/>>. Acesso em: 3 out. 2018.

SANDRONI, S. S. **Notas para o curso "Geotecnia das Barragens"**. UFRJ. Rio de Janeiro. 2006.

SANTOS, C. R.; CALDEIRA, M. M. S. L. **Processos de erosão interna em barragens de aterro e suas fundações**. XI Congresso Nacional de Geotecnia. Coimbra, Portugal: [s.n.]. 2008.

SEED, H. B. Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dam. **Géotechnique**, v. 29, n. 3, 215-263, 1979.

SEED, H. B.; DUNCAN, J. M. **The Teton Dam Failure - A Retrospective Review**. Professors of Civil Engineering, University of California. Berkeley, CA, USA. 1981.

SILVEIRA, J. F. A. Teria sido possível evitar a ruptura da barragem de Teton através de um bom plano de instrumentação? **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, n. 1, Abril 2014.

USACE. **Best Practices in Dam And Levee Safety Risk Analysis**. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation e U.S. Army Corps of Engineers. [S.l.]. 2015.

USBR. **Dam Safety Public Protection Guidelines - A Risk Framework to Support Dam Safety Decision-Making**. Denver, Colorado. 2011.

VALE. **Análise Quantitativa de Riscos em Barramentos - Definição da Probabilidade**. Companhia Vale do Rio Doce. Relatório Técnico. 2015.

ZHANG , L. et al. **Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment**. Singapura: John Willey & Sons, 2016.

**ANEXO A – TESTE DE PERDA D'ÁGUA NA BARRAGEM DE TETON  
(INDEPENDENT PANEL, 1976)**

Localização			Testes sob pressão			
Estaca	Furo	Ângulo	Intervalo (pés)	Perda d'água (gpm)	Intervalo (pés)	Perda d'água (gpm)
12+75	610	42°R	3,8 - 14,8	0,38	14,8 - 24,8	0,05
	611	20°R	2,5 - 13,9	0,48	13,9 - 23,9	0,1
	612	0°	2,1 - 13,5	0,5	13,5 - 23,5	0
13+15	613	45°R	3,4 - 14,8	1,1	14,8 - 24,8	0,2
	614	22°R	4,4 - 14,4	1,0	13,4 - 24,4	0,9
	615	0°	3,5 - 14,9	0	14,9 - 24,9	0
13+30	616*	47°R	2,9 - 14,3	10,	7,9 - 14,3	0,5
			14,3 -	5,2	18,9 - 24,3	0
	617	21°R	2,5 - 13,9	0	13,9 - 23,9	0
	618	0°	2,8 - 14,2	0	14,2 - 24,2	0,8
	619*	31°L	5,3 - 16,7	1,6	16,7 - 26,7	4,8
13+50	620	44°R	4,4 - 14,4	0,1	14,4 - 24,4	0,1
			24,4 -	0,1		
	621	22°R	3,5 - 13,5	5,1	13,5 - 23,5	0,1
			3,5 - 23,5	7,9	3,5 - 23,5	13,0
	622	0°	2,1 - 13,5	1,9	13,5 - 23,5	0
	623*	22°L	3,4 - 13,4	12,7**		
11,4-21,4			1,2	6,4 - 21,4	1,6	
13+77	624*	45°R	2,9 - 14,3	3,5	14,3 - 24,3	0
	625	0°	3,9 - 15,3	0,4	15,3 - 26,3	0
	626*	22°L	5,3 - 16,7	12,5	16,7 - 26,7	7,5
14+10	627	46°R	1,6 - 11,0	0,2	11,0 - 21,0	0,1
	628	0°	4,6 - 11,0	0	11,0 - 21,0	0,14
	629*	34°L	1,0 - 11,0	7,1	2,6 - 11,0	0,7
11,0 -			0,7			
14+26	630	47°R	1,3 - 11,7	4,3	11,7-21,7	0,4
	631	0°	1,2-11,6	0,3	11,6-21,6	0,2
	632	34°L	1,7-13,1	2,6	13,1-23,1	1,6

(a) Todos os testes de pressão foram realizados a 10 psi e o intervalo é medido ao longo do eixo do furo.

(b) R e L designam os furos inclinados para a direita e para a esquerda, respectivamente.

(c) \* Fluxos de retorno observados em juntas e fraturas a jusante da capa de graute.

(d) \*\* Durante a perfuração, houve perda de 50% de água.

## ANEXO B – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE MATERIAIS DA BARRAGEM X (GEOTÉCNICA, 1971)

